

REPORT

UMWELTPARAMETER ERNEUERBARER ENERGIE

Ermittlung relevanter Umweltparameter für die erneuerbaren Energien:
Geothermie, Photovoltaik, Windenergie, Biogas

Cindy Dengler

RADOST-Berichtsreihe
Bericht Nr: 2
ISSN: 2192-3140



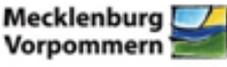
GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

KLIMZUG 
Klimawandel in Regionen

Kooperationspartner

	<p>Büro für Umwelt und Küste, Kiel BfUK</p>	 <p>Leibniz-Institut für Gewässerökologie und Binnenfischerei, Berlin IGB</p>
	<p>Geographisches Institut der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel CAU</p>	 <p>Leibniz-Institut für Ostseeforschung Warnemünde IOW</p>
 <p>Coastal Research & Management CRM</p>	<p>Coastal Research & Management, Kiel CRM</p>	 <p>Institut für ökologische Wirtschaftsforschung, Berlin IÖW</p>
	<p>Ecologic Institut, Berlin (Koordination) Ecologic</p>	 <p>Landesbetrieb Küstenschutz, Nationalpark und Meeresschutz Schleswig-Holstein, Husum LKN</p>
	<p>EUCC – Die Küsten Union Deutschland, Warnemünde EUCC-D</p>	 <p>Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume Schleswig-Holstein LLUR</p>
	<p>GICON – Großmann Ingenieur Consult GmbH – Niederlassung Rostock GICON</p>	 <p>Staatliches Amt für Landwirtschaft und Umwelt Mittleres Mecklenburg StALU MM</p>
	<p>H.S.W. Ingenieurbüro Gesellschaft für Energie und Umwelt mbH, Rostock HSW</p>	 <p>Universität Rostock, Fachgebiet Küstenwasserbau URCE</p>
	<p>Helmholtz-Zentrum Geesthacht, Zentrum für Material- und Küstenforschung HZG</p>	 <p>Johann Heinrich von Thünen-Institut, Bundesforschungsanstalt für Ländliche Räume, Wald und Fischerei, Braunschweig vTI</p>
	<p>Institut für Angewandte Ökosystemforschung, Neu Broderstorf IfaÖ</p>	

REPORT

UMWELTPARAMETER ERNEUERBARER ENERGIEN

Ermittlung relevanter Umweltparameter für die erneuerbaren
Energien: Geothermie, Photovoltaik, Windenergie, Biogas

Cindy Dengler
GICON – Großmann Ingenieur Consult GmbH

RADOST-Berichtsreihe
Bericht Nr. 2
ISSN: 2192-3140

Rostock, Januar 2010

Impressum

Herausgeber

Ecologic Institut gemeinnützige GmbH
Pfalzburger Str. 43/44
10717 Berlin
www.ecologic.eu

Inhalt erstellt durch:

GICON – Großmann Ingenieur Consult GmbH
Rosa-Luxemburg-Straße 25/26
18055 Rostock
<http://www.gicon.de>

Web

<http://www.klimzug-radost.de>

Bildrechte

Titel: © R.Krone@datadiving.de

ISSN 2192-3140

Das Projekt "Regionale Anpassungsstrategien für die deutsche Ostseeküste" (RADOST) wird im Rahmen der Maßnahme „Klimawandel in Regionen zukunftsfähig gestalten“ (KLIMZUG) vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert

Inhalt

1	Einleitung	9
1.1	Ermittlung der relevanten Umweltparameter	11
2	Geothermie	14
2.1	Einordnung der Geothermie-Parameter nach ihrer Art der Einflussnahme	17
2.2	Einfluss des Klimawandels auf die Geothermie-Parameter	18
3	Photovoltaik	20
3.1	Einordnung der Photovoltaik-Parameter nach ihrer Art der Einflussnahme	23
3.2	Einfluss des Klimawandels auf die Photovoltaik-Parameter	24
4	Windkraft	26
4.1	Einordnung der Windkraft-Parameter nach ihrer Art der Einflussnahme.....	28
4.2	Einfluss des Klimawandels auf die Windkraft-Parameter.....	30
5	Biogas	32
5.1	Einordnung der Biogas-Parameter nach ihrer Art der Einflussnahme.....	37
5.2	Einfluss des Klimawandels auf die Biogas-Parameter.....	39
6	Parameter-Matrix	42
7	Zusammenfassung	44
8	Quellen	45

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Kategorien der Parameter, deren Einfluss auf die Energienutzung und der Einfluss des Klimawandels auf die Parameter.....	12
Tabelle 2:	Parameter mit direkten / indirekten Einfluss auf die Nutzung der oberflächen-nahen Geothermie.....	18
Tabelle 3:	Durch den Klimawandel veränderbare Geothermie-Parameter	19
Tabelle 4:	Abhängigkeit Energieertrag von Modulneigung und Ausrichtung	21
Tabelle 5:	Wirkungsgrade je Baumaterial von Solarzellen	21
Tabelle 6:	Parameter mit direkten / indirekten Einfluss auf die Nutzung der Photovoltaik	23
Tabelle 7:	Durch den Klimawandel veränderbare Photovoltaik-Parameter	25
Tabelle 8:	Parameter mit direktem / indirektem Einfluss auf die Windkraftnutzung	29
Tabelle 9:	Durch den Klimawandel veränderbare Windkraft-Parameter.....	31
Tabelle 10:	Für den Anwendungsbereich des EEG anerkannte bzw. nicht anerkannte Biomasse gem. BiomasseV	32
Tabelle 11:	Durchschnittliche Zusammensetzung von Biogas	34
Tabelle 12:	Auswahl rechtlicher Rahmenbedingungen für die Errichtung und den Betrieb einer BGA	36
Tabelle 13:	Parameter mit direktem / indirektem Einfluss auf die Biogasproduktion	39
Tabelle 14:	Durch den Klimawandel veränderbare Parameter der Biogasproduktion	41
Tabelle 15:	Parameter-Matrix, Zusammenstellung der Parameter und Erneuerbaren Energien	43

Abkürzungsverzeichnis

BauGB	Baugesetzbuch
BbergG	Bundesberggesetz
BGA	Biogasanlage
BHKW	Blockheizkraftwerk
BiomasseV	Biomasse-Verordnung
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
DAS	Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
EEWärmeG	Erneuerbare-Energien-WärmeGesetz
JAZ	Jahresarbeitszahl von Wärmepumpen
KLIMZUG	Klimawandel in Regionen zukunftsfähig gestalten
KomPass	Kompetenzzentrum Klimafolgen und Anpassung
kWp	Kilowatt Peak
LBauO	Landesbauordnung
MAP	Marktanreizprogramm
MW	MegaWatt
NaWaRo	Nachwachsende Rohstoffe
OTS	Organische Trockenmasse
PR	Performance Ratio
PV	Photovoltaik
PVA	Photovoltaik-Anlage
RADOST	Regionale Anpassungsstrategien für die deutsche Ostseeküste
UBA	Umweltbundesamt
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
WKA	Windkraftanlagen
WHG	Wasserhaushaltsgesetz

1 Einleitung

Den globalen Klimawandel und seine meist negativen Folgen bekommt die Menschheit immer intensiver zu spüren. Temperaturerhöhungen, Meeresspiegelanstieg, extreme Wetter- und Klimaereignisse wie Starkniederschläge, Hitze- und Dürreperioden erschweren zunehmend die Lebensbedingungen der Erdbevölkerung. Hauptursache des rapide voranschreitenden Klimawandels ist der weltweite Anstieg der globalen atmosphärischen Konzentration von Kohlendioxid, Methan und Lachgas (Treibhausgase), der in erster Linie auf menschliche Aktivitäten, wie den Verbrauch fossiler Brennstoffe und Landnutzungsänderungen, zurückzuführen ist. Die anthropogene Erwärmung und der Meeresspiegelanstieg werden selbst bei sofortiger Stabilisierung der Treibhauskonzentrationen noch über Jahrhunderte andauern. Dennoch ist es möglich, durch den Einsatz politischer, wirtschaftlicher und technischer Maßnahmen und Instrumente die Ursachen und damit die Folgen des Klimawandels deutlich zu vermindern [1].

Ein wesentliches Klimaschutzziel ist es, durch Energieeinsparung und dem Wandel der Energiebereitstellung (effizientere Technik, erneuerbare Energiequellen), den Treibhausgasausstoß zu reduzieren und dadurch den Anstieg der globalen Durchschnittstemperatur auf maximal 2 °C, bezogen auf das vorindustrielle Temperaturniveau, zu begrenzen. Doch auch wenn dieses ambitionierte Ziel erreicht wird, werden die Folgen des Klimawandels gravierend sein. Um die möglichen nachteiligen Auswirkungen dieser Folgen auf natürliche, gesellschaftliche und wirtschaftliche Systeme gering zu halten, muss der Klimawandel weiterhin erforscht, die Risiken bewertet, Handlungsfelder und Ziele definiert und Anpassungsmaßnahmen entwickelt und umgesetzt werden [2].

Zum Thema Klimafolgen und Anpassung hat sich in der Bundesrepublik Deutschland eine breite Forschungslandschaft entwickelt. Eine Übersicht der einzelnen Projekte, ihren speziellen Forschungszielen und Ergebnissen bietet das vom Umweltbundesamt (UBA) gegründete „Kompetenzzentrum Klimafolgen und Anpassung“ (KomPass). Diese Einrichtung berät und unterstützt u.a. das Bundesministerium bei der deutschen Anpassungsstrategie (DAS) an den Klimawandel. Die Forschung über die Anpassungsnotwendigkeiten und –maßnahmen ist ein vergleichsweise neues Betätigungsfeld der Klimafolgenforschung, welches zunehmend an Bedeutung gewinnt. Das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) fördert dazu eine Reihe von Forschungsprogrammen, in die sich u.a. auch die Fördermaßnahme „KLIMZUG – Klimawandel in Regionen zukunftsfähig gestalten“ ergänzend zum Forschungsprojekt „klimazwei – Forschung für den Klimaschutz und Schutz vor Klimawirkungen“ eingliedert [3].

Ziel von KLIMZUG ist es, durch die Integration der zu erwartenden Auswirkungen des Klimawandels in regionale Planungs- und Entwicklungsprozesse, die Entwicklung innovativer Ansätze zur Anpassung an den Klimawandel zu fördern. Dadurch soll einerseits die zukünftige Wettbewerbsfähigkeit von Regionen erhöht und andererseits die Entwicklung und Nutzung neuer Technologien, Verfahren und Strategien zur Anpassung an den Klimawandel in den Regionen vorangetrieben werden. Die Umsetzung der Klimaanpassung soll durch die Bildung regionaler Netzwerke zwischen Wissenschaft, Unternehmen, Verwaltung und gesellschaftlichen Bedarfsträgern erreicht werden. Sieben regionale Kooperationsnetzwerke haben sich unter KLIMZUG gebildet. Darunter auch das Vorhaben „RADOST – Regionale Anpassungsstrategien für die deutsche Ostseeküste“ [4].

Das RADOST-Vorhaben hat, wie der Name schon sagt, die Erarbeitung von Anpassungsstrategien speziell für die deutsche Ostseeküste zum Ziel. Unter Einbeziehung von Akteuren aus Wissenschaft, Wirtschaft und Verwaltung sowie der Zivilgesellschaft, sollen u.a. Maßnahmen zur Minimierung von klimawandelbedingten Schäden für die Wirtschaft, Gesellschaft und Natur entwickelt werden. Aber auch die mit dem Wandel verbundenen Entwicklungschancen sollen erkannt und optimal ausgenutzt werden. Sinngemäß werden durch Austausch und Zusammenarbeit aller Akteure, sektorale und sektorübergreifende Problemstellungen aufgegriffen, der Stand der Forschungsarbeiten mit dem Bedarf der regionalen Akteure abgeglichen und Lösungsansätze bis hin zu konkreten Anwendungsprojekten erarbeitet [5].

Wesentliche vom Klimawandel betroffene Wirtschaftsbereiche und Handlungsfelder der deutschen Ostseeregion wurden definiert und in folgenden Fokusthemen zusammengefasst:

- Küstenschutz
- Häfen und maritime Wirtschaft
- Tourismus und Strandmanagement
- Naturschutz im Zusammenhang mit Nutzungen
- Landwirtschaft und Gewässermanagement
- Energie mit Schwerpunkt auf erneuerbare Energien.

Zielstellung in der Bearbeitung des Fokusthemas „Erneuerbare Energien“ ist es, die Auswirkungen veränderter Umweltbedingungen auf die Möglichkeiten der Nutzung erneuerbarer Energien, im Speziellen die oberflächennahe Geothermie, Windkraft, Photovoltaik und Biogas, zu prognostizieren und ggf. erforderlich werdende strategische Anpassungsempfehlungen zu erarbeiten. Dabei soll besonders auf die Erzielung von Synergieeffekten bei möglichen Kombinationen der Nutzung erneuerbarer Energien mit technischen Anlagen aus thematisch völlig anderen Bereichen geachtet werden.

Es wird angestrebt, mit den aufgezeigten Anpassungsstrategien die Grundlagen für die Festlegung von eigenen Strategien für folgende Behörden und Unternehmen zu legen, z.B. für

- die Länder M-V und S-H, sowie die anderen deutschen, ggf. auch europäischen Küstenländer, z.B. für die Anpassung von Förderstrategien für erneuerbare Energien
- Investoren (Projektentwickler, Energieunternehmen, Fondsgesellschaften) für eine langfristige Planung von Investitionen im Bereich der erneuerbaren Energien
- Komponentenherstellern (Windenergieanlagen, Biogasanlagen, Solarzellen, ...) für eine langfristige Planung von Produktionskapazitäten
- Planungsbüros, Zulieferern, Ausführungsfirmen bei der Planung von Personal- und Ausrüstungskapazitäten
- Versicherungen für die Anpassung von Versicherungstarifen für erneuerbare Energien-Projekte
- Banken für die Planung von Finanzierungskonzepten für Anlagen der erneuerbaren Energien.

Erneuerbare Energien werden meist im Zusammenhang mit der Einhaltung von Klimaschutzzieleen erwähnt. Durch ihre intensive Nutzung soll dem Klimawandel entgegengewirkt werden. Aber wie wird sich der Klimawandel auf die Nutzung der erneuerbaren Energien auswirken?

Erklärtes Ziel der Bundesrepublik Deutschland ist es die nationalen Treibhausgasemissionen bis zum Jahr 2020 auf etwa 40 % der Emissionen gegenüber denen von 1990 zu senken. Um dieses Ziel zu erreichen wird zum einen auf Energiesparmaßnahmen und zum anderen auf die vermehrte Nutzung erneuerbarer Energien gesetzt. Die erneuerbaren Energien haben bereits im Jahr 2008 mit einem Anteil von gut 9,5 % am deutschlandweiten Endenergieverbrauch beträchtlich an Bedeutung gewonnen. Durch ihre relativ CO₂-freie Nutzung wird ein entscheidender Beitrag zum Klimaschutz geleistet. Zudem fördern die erneuerbaren Energien eine Unabhängigkeit von fossilen und nuklearen Ressourcen. Bis zum Jahr 2020 will Deutschland den Anteil der erneuerbaren Energien am gesamten Endenergieverbrauch auf 20 %, bis 2050 sogar auf 50 % erhöhen. Wichtige Voraussetzungen zur Erreichung dieses Ziels hat die deutsche Bundesregierung u.a. durch den Erlass des Erneuerbare-Energien-Gesetzes (EEG 2009), dem Erneuerbare-Energien-Wärme-Gesetz (EEWärmeG 2009), der Förderung erneuerbarer Energien über gezielte Marktanzreizprogramme (MAP) und mit vielfältigen Initiativen auf dem Gebiet von Forschung und Entwicklung geschaffen [6].

Für eine gesicherte Energieversorgung der Bevölkerung in naher und ferner Zukunft, müssen die erneuerbaren Energien noch effizienter genutzt werden. Dies kann zum einen durch die ständige Verbesserung der Technik erreicht werden. Zum anderen muss die Nutzung der erneuerbaren Energiequellen situationsgerecht, d.h. an die klimawandelbedingt veränderten Umweltbedingungen angepasst, erfolgen.

Einen Ein- und Ausblick auf die u.a. klimaabhängigen Umweltbedingungen, die einen Einfluss auf die effiziente Nutzung der erneuerbaren Energien

- oberflächennahe Geothermie,
- Photovoltaik,
- Windenergie und
- Biogas

nehmen, soll der folgende Bericht geben. Er ist das Ergebnis des Arbeitspaketes Nr. 1.7.1 – Ermittlung relevanter Umweltparameter in Abhängigkeit der erneuerbaren Energien und durch den Klimawandel hervorgerufene Entwicklungen – des RADOST Fokusthemas „Erneuerbare Energien“.

1.1 Ermittlung der relevanten Umweltparameter

Grundlage für die Untersuchung der möglichen Auswirkungen des Klimawandels auf die zukünftige Nutzung von erneuerbaren Energien ist eine ausführliche Erfassung der zu betrachtenden Parameter, die den vorhandenen Bereichen oberflächennahe Geothermie, Photovoltaik, Windkraft und Biogas zugeordnet und hinsichtlich ihrer tatsächlichen Relevanz untersucht werden.

Zur Erfassung der relevanten Parameter sind folgende Fragen zu klären:

1. Welche Parameter beeinflussen die Nutzung der erneuerbaren Energien (oberflächennahe Geothermie, Windkraft, Photovoltaik, Biogas)?

2. Welche Parameter haben einen direkten bzw. indirekten Einfluss auf die Nutzung der erneuerbaren Energien?
3. Wie wird sich der Klimawandel auf die Parameter und damit auf die Nutzung der erneuerbaren Energien auswirken?

Zur Beantwortung der ersten Frage werden die genannten erneuerbaren Energieformen einzeln auf bei der Planung, Installation und Nutzung einflussnehmende Parameter hin untersucht. Die ermittelten Parameter werden zur besseren Übersicht thematisch in die Kategorien Natur, Technik, rechtliche Grundlagen und Wirtschaftlichkeit eingeteilt.

Tabelle 1: Kategorien der Parameter, deren Einfluss auf die Energienutzung und der Einfluss des Klimawandels auf die Parameter

Kategorie	Einfluss der Parameter auf die Nutzung der erneuerbaren Energie	Einfluss des Klimawandels auf die Parameter
Natur	direkt	direkt
Technik	direkt	indirekt
Recht	indirekt	indirekt
Wirtschaft	indirekt	indirekt

Im nächsten Schritt werden die Parameter nach der Art (direkt/indirekt) ihres Einflusses auf die Nutzung der Energiequelle unterschieden. Direkt mit der Nutzung einer Energiequelle in Verbindung zu bringen, sind einerseits die Eigenschaften der Energiequelle selbst (natürliches Potenzial) und andererseits die Technik zur Gewinnung der Energie. So sind z.B. die Windstärke, -dauer, und -richtung (Windkraft), Sonnenscheindauer und -intensität (Photovoltaik), Untergrundtemperatur (Geothermie) oder landwirtschaftliche Produktionskapazität (Biogas) Parameter mit direktem Einfluss auf die Energieform. Sie beschreiben das natürliche Potenzial der Energie oder auch den maximal erzielbaren Nutzen für die Menschheit. Der Energiequelle gegenüber steht die Technik, mit der sie quasi angezapft werden kann. Die technischen Parameter Bauart und Anlagendimension beeinflussen entscheidend die Effizienz bzw. den Wirkungsgrad und damit den tatsächlich erreichbaren Energiegewinn durch die Technik. Im Allgemeinen kann gesagt werden, dass der Energiegewinn umso größer ist, desto größer die Anlage dimensioniert und desto ausgereifter die Technik ist.

Indirekte Parameter beschreiben die Rahmenbedingungen unter denen die erneuerbare Energie genutzt wird. Meist sind es Einschränkungen durch natürliche Gegebenheiten (ungünstige Standortbedingungen) oder rechtliche Regelungen (Verbote, Gebote), die u.a. über die Frage ob überhaupt und wenn ja, wie viel Energie gewonnen werden kann, entscheiden. Z.B. sind dies bei der Offshore-Windkraft veränderte Wellenhöhen und -längen oder verändertes Eisvorkommen, die einen Einfluss auf die Dimensionierung der Gründungsstrukturen und damit auf die Kosten der Offshore-Windkraftanlagen haben. Weiterhin kann sich der Klimawandel auch auf Flächennutzungen auswirken, sodass z.B. Naturschutzflächen nicht mehr schützenswert sind bzw. Eignungsflächen für eine wirtschaftliche Nutzung einen Schutzstatus erhalten müssen, der eine wirtschaftliche Nutzung ausschließt. Dies kann indirekt auch Einfluss auf die Nutzung Erneuerbarer Energien haben, weil diese von einer entsprechenden Flächenverfügbarkeit abhängt. Weiterhin ist die Kostenfrage immer ein wichtiges Kriterium, welches das Ausmaß und die Qualität der Nutzung der erneuerbaren Energien beeinflusst. Die Energiequelle und die

Technik zur Energiegewinnung müssen effizient und wirtschaftlich sein, sonst rentiert sich eine Investition nicht.

Nachdem alle relevanten Parameter erfasst und zugeordnet worden sind, ist im Hinblick auf den Klimawandel zu bewerten, welche Parameter zukünftig einer Veränderung unterliegen werden. Aufgrund ihrer meist starken Abhängigkeit vom Klima, ist die Betroffenheit der natürlichen Parameter absehbar. Aber auch die rechtlichen Grundlagen, v.a. im Bezug auf die Flächennutzungsplanung können sich durch den Klimawandel verändern. Beispielsweise wird aufgrund der mit dem Klimawandel einhergehenden Temperaturerhöhung, Zunahme der Trockenheit und der CO₂-Erhöhung mit hoher Wahrscheinlichkeit ein bedeutender Anteil der heimischen Flora und Fauna einschließlich der heute für den Naturschutz besonders bedeutsamen Arten starken Veränderungen in Häufigkeit und Verbreitungsareal in Deutschland unterliegen. Diese Veränderungen können sowohl die Abnahme und regionales Aussterben als auch die Zunahme bzw. Neueinwanderung von Arten bedeuten. Im Allgemeinen werden hohe Biodiversitätsverluste sowie Veränderungen an den Arealgrenzen heimischer Pflanzen- und Tierarten zu erwarten sein [7]. In Folge dessen müssen die Schutzziele und evtl. die Grenzen ausgewiesener Naturschutzgebiete an die veränderten Gegebenheiten angepasst werden. In der Konsequenz kann dies einerseits die Lockerung bzw. Aufgabe und andererseits die Neubildung von Naturschutzgebieten und damit einhergehend Veränderungen in der Raumplanung bedeuten.

Vom Klimawandel im weitesten Sinne betroffen, sind der Stand der Technik und damit die Wirtschaftlichkeit der Energiebereitstellung aus erneuerbaren Energien. In erster Linie sind diese Parameter vom Wissen und Willen des Menschen abhängig. Je nach Motivation steigt und fällt der Grad dieser menschlichen Eigenschaften. Es ist davon auszugehen, dass mit steigender Intensivität des durch den Klimawandel verursachten Leidensdrucks, die Motivation und Bereitschaft der Menschheit in die Nutzung sowie auch in die Forschung und Weiterentwicklung der notwendigen Technik zu investieren, wachsen wird.

Die Art und Weise der aufgrund des Klimawandels zu erwartenden Veränderungen der relevanten Parameter werden in diesem Bericht nur ansatzweise für die oben genannten Energiearten betrachtet. Im weiteren Verlauf von RADOST werden sie dann, den heute bei der Nutzung erneuerbarer Energien zum Ansatz gebrachten Größenordnungen gegenübergestellt und analysiert. Die Auswirkungen zusammen mit einer abgeleiteten Prognose werden in jeweils separaten Teilberichten erläutert.

2 Geothermie

Geothermie, oder auch Erdwärme, sind Synonyme für die geothermische Energie, die in Form von Wärme unterhalb der Oberfläche der festen Erde gespeichert ist [8]. Ihre Quellen sind zum größten Teil (ca. 50 - 70 %) im Erdmantel und Erdkern stattfindende Zerfallsprozesse radioaktiver Isotope und zum kleineren Teil (ca. 30 - 50 %), die im Erdkern gespeicherte Ursprungswärme aus den Prozessen zur Zeit der Erdentstehung [12].

Im oberflächennahen Bereich bis ca. 15 m Tiefe werden die Temperaturen hauptsächlich durch das Klima beeinflusst. Der Wärmeeintrag erfolgt durch die tägliche Sonneneinstrahlung, über den Wärmeaustausch mit der Luft und durch einsickernde Niederschläge. Die in diesem Bereich herrschenden Temperaturen, die im Jahresverlauf zwischen 8 bis 12 °C schwanken, entsprechen i.A. der Jahresmitteltemperatur des jeweiligen Standortes. In der Tiefe von ca. 15 m bis 50 m bleiben die Temperaturen weitestgehend konstant und nehmen dann aufgrund des Wärmestroms aus dem Erdinneren je 100 m Teufe um ca. 3 °C zu. Je nach geologischer Situation kann die Temperaturzunahme variieren. In vulkanisch aktiven Gebieten liegt die Zunahme z.B. bei 10 – 20 °C je 100 m. Der Temperaturanstieg mit der Tiefe wird auch als geothermischer Gradient bezeichnet. Der kontinentale Wärmestrom aus dem Erdinneren beträgt im Durchschnitt ca. 0,065 W/m² [12].

Je nach Bedarf kann die thermische Energie aus dem Untergrund zum Heizen, Kühlen, zur Stromproduktion oder das Erdreich als thermischer Energiespeicher, z.B. für saisonale oder industrielle Abwärme, genutzt werden. Die Temperaturen bis in 400 m Tiefe liegen bei maximal 25 °C (oberflächennahe Geothermie) und werden vorwiegend für Heiz- und Kühlanwendungen genutzt. Die für die Stromproduktion notwendigen Temperaturen werden erst in größeren Tiefen erreicht. Im Durchschnitt herrschen in ca. 1.000 m Tiefe Temperaturen um die 60 °C und in ca. 2.000 m Tiefe Temperaturen bis 100 °C. Die Nutzung dieser sogenannten tiefen Geothermie erfolgt mit sehr aufwändiger und kostenintensiver Technologie und ist nur in sehr großem Maßstab wirtschaftlich zu betreiben. Die tiefe Geothermie ist für mittel- und kleinständische Investoren auf regionaler Ebene in ökonomischer Hinsicht uninteressant und wird deshalb im Folgenden nicht weiter behandelt.

Erdwärme ist theoretisch überall vorhanden. Je tiefer man in die Erde geht, desto wärmer wird es. Bei einer sachgerechten Bewirtschaftung erweist sich die Geothermie als eine emissionsfreie, erneuerbare und nachhaltige Energieform, die nach menschlichen Maßstäben unendlich zur Verfügung steht. Die Erschließung der oberflächennahen Erdwärme erfolgt über horizontale oder vertikale Erdreichwärmeübertrager (Erdwärmesonden, Flächenkollektoren, Erdwärmekörbe, Energiepfähle bzw. erdberührte Betonbauteile) oder durch das Abpumpen von Grundwasser über Grundwasserbrunnen [8]. Wo diese unterschiedlichen Verfahren zur Anwendung kommen, hängt vorwiegend von den örtlichen Gegebenheiten bzw. den vorhandenen geowissenschaftlichen Parametern des Untergrundes (Wärmeleitfähigkeit, Durchlässigkeit, Speichereigenschaften) ab. Die gewonnene Erdwärme kann direkt, über das Grundwasser oder durch die Lufterwärmung/ -kühlung im Erdreich, oder indirekt für Heiz- und Kühlanwendungen genutzt werden. Die indirekte Nutzung von Geothermie erfolgt über die Zwischenschaltung von Wärmepumpen. An den Erdreichwärmeübertrager angeschlossen (erdgekoppelte Wärmepumpen), heben sie das meist niedrige Temperaturniveau (8 - 12 °C) der gewonnenen Erdwärme auf ein für Heizanwendungen notwendiges Niveau von ca. 35 – 55 °C an. Kleine bis mittlere dezentrale

Geothermie-Anlagen können so Ein- oder Mehrfamilienhäuser, ganze Wohnblocks oder öffentliche Einrichtungen ausreichend mit Wärmeenergie und Klimakälte versorgen.

Anlagen zur geothermischen Nutzung des Untergrundes bestehen i.d.R. aus folgenden Elementen:

- dem Erdwärmequellensystem bzw. dem Erdreichwärmeübertrager (Flächenkollektoren, Erdwärmesonden, -körbe, Absorbermatten, Energiepfähle),
- der meist im Haus oder in Hausnähe installierten Wärmepumpe,
- dem Wärmenutzungssystem (Fußbodenheizung, Warmwasserbereitung) oder Raumklimatisierungssystem im Gebäude und
- den Verbindungsleitungen von der Wärmepumpe über den Verteiler zum Erdwärmequellensystem (Vorlauf) und über den Sammler zurück zur Wärmepumpe (Rücklauf).

Verteiler und Sammler werden i.A. außerhalb des Hauses in Erd- oder Kellerwandschächten aus Kunststoff untergebracht. Zur Vermeidung von Frostschäden bei der Verlegung mehrerer Leitungen in einem Graben, sind die „kalten“ Leitungen (meist Vorlaufleitungen) mit einer wasserunempfindlichen Isolierung zu versehen. Umgekehrt ist es sinnvoll bei größeren Längen der Rücklaufleitungen, diese gegen das Erdreich zu isolieren um, Wärmeverluste vorzubeugen. Je länger die Verbindungsleitungen der Vor- und Rückläufe ausgelegt werden, desto größer fallen die Druckverluste innerhalb der Leitungen aus. Diese müssen durch zusätzliche Pumpleistung der Wärmepumpe ausgeglichen werden, was sich negativ auf die Effizienz der Wärmepumpe auswirkt. Hilfreich ist es die Anschlussleitungen eben und setzungsfrei zu verlegen.

Die Auslegung und Ausführung von Anlagen zur thermischen Nutzung des Untergrundes erfolgt auf Basis der VDI-Richtlinie 4640 – Thermische Nutzung des Untergrundes [8]. Die Bemessung einer Geothermie- bzw. Erdwärmequellen-Anlage (Flächenkollektor, Erdwärmesonde, -korb, etc.) richtet sich nach der Heiz- bzw. Kühllast des zu versorgenden Gebäudes, den Leistungszahlen der gewählten Wärmepumpe (z.B. JAZ), der Anzahl der Volllaststunden und den spezifischen Entzugswerten des vorhandenen Untergrundmaterials (Entzugswerte siehe VDI 4640). Jede Anlage ist an ihren Standort und das jeweilige Anwendungsprofil anzupassen. Eine Über- oder Unterdimensionierung der Anlage kann zur Verminderung der Effizienz der Wärmepumpe und zu schlechteren spezifischen Entzugswerten des Untergrundes führen. Die spezifischen Entzugswerte des Untergrundes variieren je nach Ausprägung der hydrogeologischen (Durchlässigkeit, Hohlraumanteil) und thermophysikalischen Bodeneigenschaften (Wärmeleitfähigkeit, Wärmekapazität). Für die Nutzung von Erdwärme sind sowohl eine hohe Wärmeleitfähigkeit als auch eine hohe Wärmekapazität vorteilhaft. Beide Werte steigen mit zunehmendem Wassergehalt der Gesteine, wodurch sich eine hohe Wassersättigung immer günstig auswirkt. Vorzugsweise wird freibewegliches Grundwasser thermisch genutzt. Es ist aufgrund seiner ganzjährig konstanten Temperatur von 8 – 11°C besonders für Geothermie-Anlagen eine geeignete Energiequelle. Die thermische Nutzung des Grundwassers erfolgt über mindestens zwei Grundwasserbrunnen – auch geothermische Dublette genannt – über die das Grundwasser gefördert und nach der Nutzung wieder in den Grundwasserleiter zurückgeführt wird.

Bohrungen für Grundwasserbrunnen und Erdwärmesonden stellen mit Tiefen von 20 m bis zu 250 m einen nicht unerheblichen Eingriff in den Untergrund und teilweise auch in den Grundwasserhaushalt dar. Entsprechend der betroffenen Bereiche Boden und Wasser sind für die Planung und Errichtung von Anlagen zur thermischen Nutzung des Untergrundes

berg- und wasserrechtliche Vorschriften zu beachten. Nach dem Bundesberggesetz (BBergG) sind oberflächennahe Geothermie-Vorhaben, solange sie grundstücksbezogen bleiben und nicht tiefer als 100 m in den Untergrund reichen, bergrechtlich nicht relevant. Dagegen bedürfen grundstücksübergreifende oder eine „Aufsuchung“ erfordernde Geothermie-Projekte einer Bergbaubewilligung sowie eines bergrechtlichen Betriebsplanverfahrens. Bohrungen für Erdwärmesonden, die tiefer als 100 m in den Untergrund reichen, unterliegen mindestens der bergrechtlichen Anzeigepflicht [13].

Einer wasserrechtlichen Anzeigepflicht unterliegen alle Anlagen zur thermischen Nutzung des Untergrundes. Während der Betrieb von offenen geothermischen Anlagen (geothermische Dublette) generell einer wasserrechtlichen Genehmigung bedarf, hängt die Notwendigkeit einer Genehmigungspflicht für geschlossene geothermische Systeme vom jeweiligen wasserrechtlichen Benutzungstatbestand ab. Flächenkollektoren z.B. bedürfen aufgrund ihrer geringreichenden Tiefe in den Untergrund (ca. 2 m) keiner wasserrechtlichen Genehmigung [13]. Umgekehrt können auch die hydrogeologischen Umstände zu einer Einschränkung bzw. auch zu einem Verbot der Nutzung der Erdwärme in einem Gebiet führen. So sind in Trinkwasserschutzzonen I und II die Errichtung und der Betrieb von Geothermie-Anlagen nicht erlaubt.

Spricht rechtlich gesehen der thermischen Nutzung des Untergrundes nichts entgegen, so ist auch aus technischen Gründen nicht jeder Standort zur geothermischen Nutzwärmeerzeugung geeignet. Flächen mit vorhandenen Infrastrukturelementen wie Versorgungsleitungen für Strom, Gas, Wasser usw. oder anderen etwaigen Hindernissen für das Bohrgerät sind von einer möglichen geothermischen Nutzung ausgeschlossen. Die Errichtung von Geothermie-Anlagen, v.a. von Erdwärmesonden, Energiepfählen und Grundwasserbrunnen, wird aus ökonomischen und technischen Gründen vorzugsweise in Verbindung mit dem Neubau von Gebäuden realisiert. Ein Großteil der Investitionskosten entsteht, neben der Anschaffung der Technik, durch die notwendigen Erdarbeiten beim Einbau der Erdwärmequellenanlagen. Diese Erdarbeiten sollten im günstigsten Fall mit den Erdarbeiten beim Hausbau verbunden werden. Für die Nachrüstung mit Geothermie-Anlagen eignen sich vorwiegend Flächenkollektoren, Erdwärmekörbe, Absorbermatten und ähnliche Systeme, die mit weniger Aufwand nur wenige Meter tief (2 – 5 m) in den Untergrund eingebracht werden. Voraussetzung dafür ist eine genügend große, verfügbare Fläche, die nicht weiter bebaut, versiegelt oder mit großen Gehölzen bepflanzt werden darf.

Die Kosten der direkten Nutzung der Erdwärme in Deutschland sind generell abhängig vom Standort, der Architektur und den Baumaterialien. In der Anschaffung fallen Wärmepumpen-Heizanlagen teurer aus als in der Leistung vergleichbare Gas- oder Öl-Heizsysteme. Die Kosten variieren je nach Größe, Leistungsstärke und Qualität der Anlagen. Die jährlichen Betriebskosten (v.a. Energiekosten für die Pumpe, Wartung, Zählergebühr) von Wärmepumpen-Heizanlagen sind dagegen bis zu 70 % günstiger als bei herkömmlichen Heizanlagen. Grund dafür ist v.a. die kostenlose geothermische Energie, die bis zu 75 % der produzierten Heizenergie ausmacht. Zudem fallen bei einer qualitativen Wärmepumpenheizung mit Erdwärmesonde und Fußbodenheizung der bei Öl- oder Gasbrennwertheizungen notwendige Tankraum, Kamin, Ölbehälter, Jahresservice, Rauchfangkehrer etc. weg [14]. Bei der Finanzierung von Geothermie-Anlagen können Investoren mit finanzieller Unterstützung durch Bund, Länder und Kommunen rechnen. Das Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA) bietet Zuschüsse zu den Investitionskosten bei der Anschaffung einer effizienten Wärmepumpe an. Die KfW-Förderbank stellt im Rahmen einiger Förderprogramme, unter Einhaltung entsprechender

Bedingungen, den Investoren zinsverbilligte Darlehen zur Verfügung. Zudem bieten viele Energieversorger Sondertarife für Wärmepumpenbetreiber an.

Je nach Betriebsbedingungen können sich Anlagen, die die oberflächennahe Geothermie nutzen, schon nach 5 Jahren amortisiert haben [16]. Begünstigend wirken sich in jedem Fall ein energiesparsames Verhalten der Verbraucher, eine gute Wärmedämmung des Gebäudes sowie eine an die hydrogeologischen und thermophysikalischen Eigenschaften des Untergrundes angepasste Erdwärmequellenanlage aus.

2.1 Einordnung der Geothermie-Parameter nach ihrer Art der Einflussnahme

Direkten Einfluss auf die wirtschaftliche Nutzung von geothermischer Energie haben in erster Linie die natürlichen Parameter Temperaturangebot und Abbaubarkeit der Wärmeenergie. Die Höhe des geothermischen Potenzials vor Ort entscheidet über die Frage, ob sich eine Anlage zur thermischen Nutzung des Untergrundes rentiert. Bei einer positiven Entscheidung, wird unter Einbezug der gegebenen Rahmenbedingungen (techn. Richtlinien, rechtl. Grundlagen, zukünftiges Anwendungsprofil, Kostensituation) die Wahl über die Anlagenart und –dimensionierung getroffen.

Die technischen Parameter haben ebenfalls direkten Einfluss auf die Nutzung von Geothermie. Je nach Bauart und Größe der Anlage unterscheidet sich die Intensivität, mit der der Untergrund thermisch genutzt wird. Flächenkollektoren, die nur 1 – 2 m tief verlegt werden, können vergleichsweise wenig der im Untergrund vorhandenen Erdwärme nutzen, während Erdwärmesonden, die bis zu 400 m in den Untergrund hineinreichen, wesentlich mehr Wärmeenergie beziehen können. Die technische Ausgestaltung der thermischen Nutzung des Untergrundes hängt wiederum von den natürlichen Gegebenheiten am geplanten Anlagenstandort ab.

Die wirtschaftlichen Parameter haben indirekten Einfluss auf die thermische Nutzung des Untergrundes. Durch eine gute Effizienz, moderate Herstellungskosten und durch Umweltfreundlichkeit kann die Nutzung der Geothermie eine große Akzeptanz in der Bevölkerung erreichen. Die Entscheidung über eine Investition in die Anschaffung einer Geothermie-Anlage wird in den meisten Fällen nach der Rentabilität der Anlage getroffen. Ein positives Image der Technologie zur thermischen Nutzung des Untergrundes ist sehr vorteilhaft und führt wahrscheinlich zu verstärkten Investitionen, dadurch zu fortschreitenden Entwicklungen und einer verbesserten Wirtschaftlichkeit und gesteigerten Wettbewerbsfähigkeit der Technologien.

Wie die Wirtschaftlichkeit haben auch die rechtlichen Rahmenbedingungen indirekten Einfluss auf die thermische Nutzung des Untergrundes. So kann durch rechtliche Regelungen die Errichtung und der Betrieb geothermischer Systeme in bestimmten Gebieten verboten oder zumindest stark eingeschränkt werden. Dies ist v.a. in Wasserschutzgebieten der Fall.

Tabelle 2: Parameter mit direkten / indirekten Einfluss auf die Nutzung der oberflächen-nahen Geothermie

	Kategorie	Parameter
direkter Einfluss	Natur	<ul style="list-style-type: none"> • vorhandenes oberflächennahes Temperaturangebot, abhängig von: • Lufttemperaturen • Niederschlag • „Abbaubarkeit“ der Geothermie, abhängig von den Untergrundeigenschaften: • Wärmeleitfähigkeit λ [W/mK] • Wärmespeicherfähigkeit c_p [MJ/m³K]
	Technik	<ul style="list-style-type: none"> • Anlagenarten • Anlagendimensionierung
indirekter Einfluss	Recht	<ul style="list-style-type: none"> • Wasserhaushaltsgesetz (WHG) und Landeswassergesetze • Bundesberggesetz (BergG)
	Wirtschaft	<ul style="list-style-type: none"> • Investitionskosten • Betriebskosten (Reparatur, Wartung, Versicherungen ...) • Kosteneinsparung durch Deckung des Eigenstrombedarfs • Fördermittel z.B. KfW-Bank Zuschüsse, günstige Darlehen etc.

2.2 Einfluss des Klimawandels auf die Geothermie-Parameter

Vor allem durch den Temperaturanstieg und die veränderten Niederschlagverhältnisse wird sich der Klimawandel auf die Untergrundtemperatur und die Bodenfeuchte und damit auf die Nutzung der Geothermie auswirken. Optimal für die geothermische Nutzung des Untergrundes sind ein konstantes Temperaturangebot und eine gute Wärmeleitfähigkeit (abhängig von der Bodenfeuchte). Möglichst hohe Temperaturen sind natürlich im Winter zum beheizen von Wohnräumen und zur Warmwasseraufbereitung gewünscht. Kühle Temperaturen werden im Sommer zu Kühlzwecken gebraucht.

Das Temperaturangebot in den oberen 15 m des Untergrundes passt sich relativ an die durchschnittlichen Lufttemperaturen an. Das bedeutet, dass in den Sommermonaten, wenn der Bedarf an Klimakälte am höchsten ist, sich das Temperaturangebot im Untergrund im oberen Temperaturbereich befindet. Dies ist für eine ökonomische Nutzung der Geothermie zu Klimatisierungszwecken von Nachteil. Von Vorteil ist dagegen, dass die wärmeren Sommertemperaturen den Untergrund stärker aufheizen und die gespeicherte Wärme in den mildereren Wintermonaten zu Heizzwecken genutzt werden kann. Dabei begünstigen die höheren Temperaturen im Untergrund und die relativ milden Lufttemperaturen im Winter die ökonomische und ökologische Nutzung der Geothermie.

Wesentlichen Einfluss auf die gute thermische Nutzung des Untergrundes hat der Wasserhaushalt des Bodens. Je höher die Bodenfeuchte, desto ausgeprägter sind die Wärmespeicher- und leitfähigkeit des Untergrundes. Die v.a. in nordöstlichen Regionen Deutschlands schon heute in den Sommermonaten auftretende Trockenheit wirkt sich

negativ auf die oberflächennahe thermische Nutzung des Untergrundes aus. Trockene Böden liefern sehr schlechte Entzugswerte und eignen sich zumindest in den Sommermonaten weder zur wirtschaftlichen Wärme- noch zur Kältengewinnung. In den Wintermonaten könnten sich die Bodenfeuchteverhältnisse durch ausreichend Niederschlag wieder bessern. Dennoch besteht die Gefahr einer dauerhaften Grundwasserabsenkung durch die verringerte Grundwasserneubildung in den Sommermonaten.

Indirekten Einfluss auf die thermische Nutzung des Untergrundes haben, wie oben schon genannt, u.a. die genehmigungsrechtlichen Vorschriften. Sie setzen z.B. fest, dass in Trinkwasserschutzgebieten keine oder nur eingeschränkt Geothermie-Anlagen errichtet und betrieben werden dürfen. Durch den Klimawandel könnten sich die Grundwasserverhältnisse verändern und Trinkwasserschutzgebiete verschwinden, vergrößern oder verlagern. In diesem Zusammenhang verändern sich auch die potenziell thermisch nutzbaren Flächen.

Noch nicht hinreichend bekannt sind die möglichen negativen Auswirkungen der thermischen Nutzung des Untergrundes. Durch den vermehrten Einsatz von Geothermie-Anlagen sind heute schon Erscheinungen wie der „Wärmeklau“ durch größere Geothermie-Anlagen auf Nachbargrundstücken zu beobachten. Zukünftig könnten also bauordnungsrechtliche Vorschriften die Errichtung von Erdwärmennutzungssystemen, v.a. durch Abstandsregelungen und Begrenzung der Anlagendimensionen regeln. Auch negative Auswirkungen auf die Natur könnten in Zukunft verstärkt zu naturschutzrechtlichen Eingriffsregelungen führen.

Auf die Wirtschaftlichkeit kann der Klimawandel nur indirekt Einfluss nehmen. Einerseits indem sich durch ihn die Bedingungen für eine wirtschaftliche Nutzung der Geothermie zum Vorteil oder zum Nachteil entwickeln. Vorteilhaft sind Veränderungen der Bodeneigenschaften, die den Entzug der Erdwärme begünstigen. Dies sind v.a. die Bodenfeuchtigkeit bzw. die Grundwasserverhältnisse. Andererseits übt die, durch den Klimawandel entstehende Notwendigkeit zur Nutzung erneuerbarer Energien, Druck auf die Weiterentwicklung der dazu notwendigen Technologien aus. Damit die Nutzung der Geothermie wettbewerbsfähig ist, muss sie wirtschaftlich zu betreiben sein.

Für die Ableitung von Anpassungsstrategien zur Nutzung von geothermischer Energie werden die in Tabelle 3 aufgeführten Faktoren im Hinblick auf ihre mögliche Veränderung durch den Klimawandel im Rahmen von RADOST untersucht.

Tabelle 3: Durch den Klimawandel veränderbare Geothermie-Parameter

Durch den Klimawandel veränderbare Geothermie-Parameter	
direkter Einfluss des Klimawandels	indirekter Einfluss des Klimawandels
<ul style="list-style-type: none"> • hydrogeologische und thermophysikalische Eigenschaften des Untergrundes • klimatische Verhältnisse wie Lufttemperatur und Niederschlagsverhältnisse • Bedarf und Anwendungsprofil von Geothermie 	<ul style="list-style-type: none"> • gesetzliche Rahmenbedingungen zu Errichtung und Betrieb von Geothermie-Anlagen • Wirtschaftlichkeit der Nutzung der oberflächennahen Geothermie

3 Photovoltaik

Photovoltaik bezeichnet den Zweig der Energietechnik, der sich mit der Umwandlung von solarer Strahlungsenergie (Photonen) in elektrische Energie beschäftigt. Dies geschieht mit Hilfe von Solarzellen [23].

Solarzellen bestehen aus zwei Halbleiterschichten, meist aus Silizium, zwischen denen durch Einwirkung von Sonnenlicht eine elektrische Spannung entsteht. Mehrere Solarzellen werden in Reihe oder parallel zu Modulen zusammengeschlossen, die einerseits in oder an Gebäudehüllen installiert oder als freistehende Anlagen aufgestellt werden können. Weiterhin gehört zu jeder Photovoltaik-Anlage ein Wechselrichter, der den in der Solaranlage erzeugten Gleichstrom in Wechselstrom umwandelt. Ein Transformator wandelt die Wechselspannung des Wechselrichters in eine für das Stromnetz notwendige höhere Wechselspannung um. Handelt es sich bei einer Photovoltaik-Anlage um eine sogenannte Inselanlage, d.h. nicht an das öffentliche Stromnetz gekoppelte Anlage, muss zusätzlich ein Akkumulator zur Speicherung der erzeugten Strommenge installiert werden.

Grundlage für einen ertragreichen Stromgewinn durch Photovoltaik-Anlagen, ist die intensive und langandauernde Sonnenbestrahlung der Solarzellen bzw. -module. Die Strahlungsintensität hängt vom Einfallswinkel der solaren Strahlung ab, welcher wiederum je nach geografischer Breite des Aufstellungsortes, der Deklination (Jahresgang) und dem Stundenwinkel (Tagesgang) der Sonne variiert. Die Sonnenscheindauer wird hauptsächlich von den lokal vorherrschenden klimatischen Bedingungen beeinflusst. Häufig starke Bewölkung reduziert den Energiegewinn durch Photovoltaik-Anlagen. Hohe Ertragsverluste kommen auch durch Verschattung und zu hohe Temperaturen der Solarmodule zustande. Verschattungen entstehen durch Ablagerungen von Laub, Schnee, Staub oder Vogelkot auf den Solarmodulen, aber auch durch schattenwerfende Objekte in der näheren Umgebung, wie z.B. hohe Bäume, Gebäude, Antennenmasten etc.. Hohe Temperaturen innerhalb der Solarzellen entwickeln sich v.a. im Sommer, wenn zusätzlich zur zellinternen Temperaturentwicklung, die warmen Sommertemperaturen auf die Solarzellen einwirken. Dabei können Temperaturen bis zu 70 °C entstehen. Zunehmende Zelltemperaturen bewirken eine Abnahme der Stromproduktion, v.a. bei kristallinen Silizium-Solarzellen [23]. Als Richtwert – oder auch Temperaturkoeffizient – wird eine Leistungsabnahme um ca. 0,3 % bis 0,4 % bei einem Temperaturanstieg um 1 °C im Vergleich zur Betriebstemperatur von ca. 20 – 25 °C angenommen. Um diesem Effekt entgegenzuwirken, sollten die Solarmodule beispielsweise mit einem genügend großen Hinterlüftungsabstand zu Dach- oder Fassadenflächen installiert werden.

Idealerweise trifft die solare Strahlung in einem rechten Winkel auf die Solaranlage. In Mitteleuropa bzw. in Norddeutschland wird der niedrigere Einstrahlungswinkel der Sonne (zw. 20° im Winter und 60° im Sommer) durch eine entsprechende Ausrichtung der Solaranlagen annähernd ausgeglichen. Der Energieertrag variiert dabei je nach Ausrichtung der Anlage im Bereich von 30 % – 100 % (s. Tabelle 4). Vorteilhaft haben sich eine Süd-Ausrichtung mit einer maximalen Abweichung von je 30 ° nach Westen oder Osten, sowie ein Neigungswinkel der Solarmodule zwischen 25° - 35° herausgestellt. Noch besser im Energieertrag sind dem Sonnenverlauf nachgeführte Photovoltaik-Anlagen.

Tabelle 4: Abhängigkeit Energieertrag von Modulneigung und Ausrichtung [19]

Modulausrichtung nach	Modulneigung			Energieertrag
	10°	30°	90°	
Osten	90 %	85 %	60 %	
Süden	90 %	100 %	75 %	
Westen	90 %	85 %	60 %	
Norden	90 %	70 %	30 %	

Das langjährige Mittel der Global- bzw. Sonnenstrahlung in Deutschland liegt zwischen 900 – 1.200 kWh/m²a [22]. Das Verhältnis vom tatsächlich genutzten Anteil der Globalstrahlung zum Anteil der daraus mittels einer Solarzelle erzeugten elektrischen Energie wird durch den Zellwirkungsgrad wiedergegeben. Dieser hängt stark vom Baumaterial der Solarzelle ab. Das wichtigste Baumaterial aktuell marktüblicher Solarzellen ist immer noch Silizium. Es wird in drei Varianten mit unterschiedlichen Wirkungsgraden hergestellt (s. Tabelle 5). Weitere Halbleitermaterialien zur Herstellung von Solarzellen sind Gallium-Arsenid (GaAs), Germanium (Ge), Cadmium-Tellurid (CdTe) und Kupfer-Indium-Diselenid (CIS) [28].

Tabelle 5: Wirkungsgrade je Baumaterial von Solarzellen [23]

Baumaterial der Solarzelle	Zellwirkungsgrad
monokristallines Silizium	14 - 17 %
polykristallines Silizium	13 - 15 %
amorphes Silizium	5 - 7 %

Abhängig vom Wirkungsgrad einer Solarzelle kann grob die zur Erzeugung eines Kilowatt-Peaks (kWp) notwendige Modulfläche berechnet werden. Ein Modul mit einem Wirkungsgrad von 10 % benötigt eine 10 m² große Fläche für die Installation von 1 kWp. Den Wirkungsgrad einer gesamten Photovoltaik-Anlage (Gesamt- oder Systemwirkungsgrad) erhält man durch die Multiplikation des Zellwirkungsgrades mit der Performance Ratio - oder auch Qualitätsfaktor Q. Dieser Wert stellt das Verhältnis zwischen dem tatsächlichen Energieertrag der gesamten Photovoltaik-Anlage zum theoretisch möglichen Energieertrag dar. In diesen fließen die Verluste des Wechselrichters sowie überschlägige Verluste durch Abschattungen und hohe Temperaturen ein. Die Performance Ratio leistungsfähiger Photovoltaik-Anlagen liegt im Bereich von 0,7 bis 0,85 [23].

Aufgrund der geringen Wirkungsgrade ist die Photovoltaik eine sehr flächenintensive Technik zur Stromproduktion. Die heutigen Standard-Solarmodule aus kristallinen Siliziumzellen benötigen je kWp installierte Leistung eine Aufstellungsfläche zwischen ca. 7 m² (monokristalline Zellen) und 10 m² (polykristalline Zellen) [23]. Die Nennleistung in kWp bezieht sich dabei auf die Leistung einer Solarzelle bei Standard-Testbedingungen, d.h. bei einer Modultemperatur von 25°C, 1000 W/m² Bestrahlungsstärke und einer Luftmasse von 1,5 [26]. Mittels genehmigungsrechtlicher Regelungen wird in Deutschland einem übermäßigen Landschaftsverbrauch durch den großen Flächenbedarf von Photovoltaik-Anlagen gegengesteuert. Grundsätzlich gelten Photovoltaik-Vorhaben in Außenbereichen

nach dem Baugesetzbuch (BauGB) als nicht genehmigungsfähig, da i.d.R. davon auszugehen ist, dass sie sogenannte öffentliche Belange wie Natur- und Landschaftsschutz, Erhalt von kulturellem Erbe etc. beeinträchtigen werden.

Für die Planung und Errichtung von Photovoltaik-Anlagen ist laut BauGB keine Ausweisung von Eignungsgebieten vorgesehen. Gemeinden haben aber die Möglichkeit im Rahmen der Flächennutzungs- und Bauleitplanung Standorte für großflächige Photovoltaik-Anlagen zu bestimmen. Sie haben dabei im Gegensatz zu den meisten anderen Zulassungsverfahren aufgrund ihrer Planungshoheit die volle Entscheidungsfreiheit, ob sowie ggf. wo und in welcher Größe sie einen B-Plan aufstellen wollen. Um Natur- und Landschaftspotenziale zu schonen sind in den Landesbauordnungen (LBauO) dafür Standortprioritäten festgelegt worden. Diese sind neben Dächern und Fassaden von Gebäuden, Einrichtungen des Lärmschutzes, Siedlungsbrachen, versiegelte Flächen, gesicherte Altlastflächen sowie in Grünland umgewandelte Ackerflächen [20].

Dach- und Fassadenflächen, die sonst nicht genutzt werden können, sind der kostengünstigste Aufstellungsort für Photovoltaik-Anlagen, v.a. wenn sie sich schon im Besitz des Investors einer Photovoltaik-Anlage befinden. In diesem Fall entfällt der Kostenfaktor „Ankauf/Pachtung von geeigneten Flächen“ bei der Investition. Da Dachflächen sehr begehrte Aufstellungsorte für Photovoltaik-Anlagen sind, aber nicht jeder Dacheigentümer die Mittel hat in eine Solaranlage zu investieren, hat sich derzeit die Vermietung von Dachflächen an größere Anlagenbetreiber als gängige Praxis etabliert. Für die Dacheigner entstehen dabei keine größeren Pflichten und sie werden prozentual am Stromertrag beteiligt [27].

Die Kosten für eine Photovoltaik-Anlage richten sich nach ihrer Qualität und Leistungsstärke. Je kWp installierter Leistung muss derzeit mit durchschnittlichen Anschaffungskosten in Höhe von 3.870 – 4.280 €/kWp (Preistrend September 2009 [23]) gerechnet werden. Die Preise pro kWp beziehen sich dabei auf eine schlüsselfertige Photovoltaik-Anlage inklusive Module, Wechselrichter, Montagegestell, elektrische Verkabelung, Planung und Installation. Die Betriebskosten für Wartung, Reparaturen, neuer Wechselrichter oder andere Ersatzteile sowie Miete für den Stromzähler zum Messen des eingespeisten Stroms, belaufen sich ungefähr auf 1 – 1,5 % des Anlagenwertes pro Jahr [24].

Eine 5 kWp-Anlage deckt schätzungsweise den Jahresstrombedarf einer vierköpfigen Familie. Bei der Finanzierung der bis zu 22.000 € hohen Investitionskosten können Investoren sich durch verschiedene Fördermöglichkeiten unterstützen lassen. Neben der Einspeisevergütung, die in Deutschland durch das Gesetz für den Vorrang Erneuerbarer Energien (EEG) geregelt ist, gibt es weitere Programme auf Bundes- und Länderebene, die die Anschaffung von Photovoltaik-Anlagen fördern sollen. Als wichtigste nach dem EEG sind die Förderprogramme der KfW-Förderbank zu nennen, die Fördergelder in Form von zinsgünstigen Darlehen vergibt [25]. Ausgehend von einer geschätzten Lebensdauer von 20 Jahren und einer gesicherten Einspeisevergütung für 20 Jahre, sollte die vollständige Amortisation der Photovoltaik-Anlage spätestens nach 20 Jahren erfolgt sein. Die Amortisation einer Photovoltaik-Anlage wird hauptsächlich durch die Höhe des Einnahmeüberschusses beeinflusst, der wiederum von den Investitionskosten, den laufenden Betriebskosten und v.a. von der Höhe des Stromertrags abhängt.

3.1 Einordnung der Photovoltaik-Parameter nach ihrer Art der Einflussnahme

Einen direkten Einfluss auf die Nutzung der solaren Strahlungsenergie mittels Photovoltaik-Anlagen haben die natürlichen und technischen Parameter (s. Tabelle 6). Je nach Einstrahlungsverhältnissen am jeweiligen Standort ist abzusehen ob und wie wirtschaftlich eine Photovoltaik-Anlage betrieben werden kann. Im Wesentlichen bestimmen die Intensität der Globalstrahlung, die Sonnenscheindauer und die Lufttemperatur den Stromertrag von Solargeneratoren. Aber auch die technische Ausführung (Neigung, Ausrichtung, Größe, Wirkungsgrad) trägt entscheidend zum ertragreichen Betrieb der Anlagen bei.

Die genehmigungsrechtlichen und wirtschaftlichen Parameter (s. Tabelle 6) nehmen durch Standortsteuerung und Preis-Leistungs-Verhältnisse nur indirekten Einfluss auf die photovoltaische Energieproduktion. Rechtlich steht der Errichtung von PVA nicht viel entgegen. Die Gemeinden haben in diesem Fall die Planungshoheit und die volle Entscheidungsfreiheit, ob sowie ggf. wo und in welcher Größe sie eine PVA errichten wollen. Die Standortwahl wird aber auch stark durch die Regelungen des EEG beeinflusst. Demnach besteht ein Vergütungsanspruch für den aus PV-Freiflächenanlagen erzeugten Strom nur, wenn die Anlage u.a. sich auf Flächen befindet, die bereits versiegelt, Konversionsflächen oder zu Grünland umgewandelte Ackerflächen sind.

Die EEG-Einspeisevergütung für Strom aus PV-Anlagen ist der wichtigste wirtschaftliche Faktor. Derzeit beträgt sie max. 43,01 Cent/kWh für Anlagen an oder auf Gebäuden und 25,01 Cent/kWh für Freiflächen-Anlagen [29]. Ohne Anspruch auf EEG-Vergütung ist eine PV-Freiflächenanlage heute unwirtschaftlich. Das heißt, ohne die Förderung durch das EEG würde kaum oder gar nicht in Freiflächenanlagen investiert werden. Fehlende Investitionen wirken sich meist hemmend auf die technische Weiterentwicklung und damit auf die Wettbewerbsfähigkeit aus. Um auch ohne Förderung rentabel zu sein, muss sich der Wirkungsgrad der Photovoltaik-Technologien noch stark anheben.

Tabelle 6: Parameter mit direkten / indirekten Einfluss auf die Nutzung der Photovoltaik

	Kategorie	Parameter
direkter Einfluss	Natur	<ul style="list-style-type: none"> • Globalstrahlung • Sonnenscheindauer • Lufttemperatur
	Technik	<ul style="list-style-type: none"> • Neigungswinkel des Solarmoduls • Ausrichtung des Solarmoduls oder Sonnennachführung • Wirkungsgrad der Solarzellen bzw. des Gesamtsystems • Dimension der Photovoltaik-Anlage
indirekter Einfluss	Recht	<ul style="list-style-type: none"> • Baugesetzbuch (BauGB) • Landesbauordnung (LBO)
	Wirtschaft	<ul style="list-style-type: none"> • Investitionskosten (Kauf, Bau, Netzanschluss) • Betriebskosten (Reparatur, Wartung, Versicherungen ...) • Erträge durch EEG-Einspeisevergütung • Kosteneinsparung durch Deckung des Eigenstrombedarfs • Fördermittel z.B. KfW-Bank Zuschüsse, günstige Darlehen etc.

3.2 Einfluss des Klimawandels auf die Photovoltaik-Parameter

Direkte klimawandelbedingte Veränderungen erfahren in erster Linie die natürlichen Parameter (s.

Tabelle 7). Die Sonnenscheindauer z.B. unterliegt im Jahres- und Tagesgang der Sonne und durch die jeweiligen lokalen klimatischen Bedingungen starken Schwankungen. Jahres- und Tagesverlauf der Sonne entstehen durch die Bewegung der Erde um sich selbst und um die Sonne und sind vom Klima unabhängig. Auf die Stärke und Häufigkeit der Bewölkung und auch auf die Temperaturen an einem Standort hat das jeweilige regionale Klima dagegen sehr starken Einfluss. Weniger intensive Bewölkung hat eine höhere Sonnenscheindauer und damit theoretisch einen gesteigerten Stromertrag durch PVA zur Folge. Andererseits trägt eine längere Sonnenscheindauer auch zu einer erhöhten Lufttemperatur bei, welche sich wiederum negativ auf die Stromproduktion in den Solarzellen auswirkt. Ideale klimatische Bedingungen für die photovoltaische Stromproduktion wären folglich eine Kombination aus wolkenfreiem Himmel mit viel Sonnenschein und kühlen Temperaturen bis maximal 25 °C.

Die Strahlungsintensität bzw. Globalstrahlung beschreibt, wie viel von der Strahlungsleistung der Sonne nach dem Durchgang durch die Erdatmosphäre auf der Erdoberfläche noch zur Verfügung steht. Die solare Strahlungsleistung außerhalb der Erdatmosphäre (Solarkonstante) beträgt im jährlichen Mittel etwa 1,37 kW/m². Auf dem Weg durch die Atmosphäre entstehen durch Reflexion und Absorption an Wasserdampf, Kohlendioxid, Ozon oder anderen atmosphärischen Spurengasen Strahlungsverluste in Höhe von bis zu 53 %. Die Abschwächung der Sonnenstrahlung variiert je nach Sonnenstand, atmosphärischer Trübung und der Dichte der atmosphärischen Medien [21].

Die Beträge der jährlichen Globalstrahlung variieren stark je nach geografischer Breite des Standortes. Während in Wüstengebieten im Bereich des Äquators eine jährliche Globalstrahlung von mehr als 2.200 kWh/m² ankommt, beträgt sie in Deutschland nur rund 900 – 1.100 kWh/m². Wie sehr die Strahlungsdaten variieren, lässt sich gut auf Globalstrahlungskarten, die unter anderem der Deutsche Wetterdienst erstellt, erkennen. Deutschland weist eine grobe Dreiteilung des Strahlungsklimas auf, die sich vorrangig durch die Einflüsse von kontinentalem oder maritimem Klima erklären lässt. Die langjährigen durchschnittlichen Strahlungswerte (Messzeitraum 1981 – 2000) der Küstenregionen Mecklenburg-Vorpommerns und Schleswig-Holsteins liegen zwischen 900 – 1.000 kWh/m².

Nahm die Globalstrahlung in den 50er bis 80er Jahren noch ab, geht der derzeitige Trend mit ca. +0,2 % bis +0,4 % pro Jahr wieder aufwärts. Seit Beginn der Messungen von 1891 schwanken die Globalstrahlungswerte innerhalb 70jähriger Zeitperioden um +/- 15 % vom langjährigen Durchschnittswert (ca. 3.600 MJ/m² bzw. 1.000 kWh/m²). Als Ursache dieser Schwankungen und Trends sind einerseits astronomische Einflüsse, wie z.B. Änderungen der Sonnenaktivität zu nennen. Zum anderen unterliegt die Globalstrahlung bei ihrem Weg durch die Atmosphäre Veränderungen aufgrund sehr variabler Einflüsse (z.B. Bewölkungsgrad). Der Einfluss des derzeit stattfindenden Klimawandels auf die Globalstrahlung ist weitestgehend ungeklärt. Eine Trendvorsage für die weitere Entwicklung der Globalstrahlung anzugeben, ist daher kaum möglich. Die Ursachen und Vorgänge, die zur Änderung der Globalstrahlung führen, müssen noch genauer erforscht werden [21].

Die Technik, rechtliche Belange und die Ökonomie von Photovoltaik-Anlagen werden vom Klimawandel indirekt beeinflusst (s.

Tabelle 7). Die Auswirkungen des Klimawandels, v.a. auf die technischen und wirtschaftlichen Parameter, sind hauptsächlich darin erkennbar, dass ihre Entwicklung, durch die Dringlichkeit sich von den fossilen Energieressourcen abzuwenden, auch weiterhin stark gefördert und vorangetrieben werden muss. Veränderungen der rechtlichen Rahmenbedingungen der Photovoltaik können sich, ähnlich wie bei der Geothermie, v.a. auf die Flächenverfügbarkeit für Photovoltaik-Projekte auswirken.

Die Photovoltaik ist eine sehr flächenintensive Art der Energiegewinnung, aber auch eine der umweltfreundlichsten, da Sonnenlicht als Energiequelle unbegrenzt zur Verfügung steht und im Betrieb der PV-Anlage weder Lärm- noch Schadstoffemissionen auftreten. Die Errichtung von PVA als Eingriff in die Natur und Landschaft könnte also in Zukunft weniger streng bewertet werden. Optisch interessant gestaltet, könnten sie zur Schönheit, Vielfalt und Eigenart von Landschaften beitragen. Denkbar sind auch Kombinationen von Flächennutzungen. So könnten unter höher gelagerten Solarmodulen evtl. Gartenbau, Viehhaltung oder ähnliche verträgliche Nutzungen realisiert werden.

Für die Ableitung ähnlicher Anpassungsstrategien zur Nutzung von PVA werden die in

Tabelle 7 aufgeführten Faktoren im Hinblick auf ihre mögliche Veränderung durch den Klimawandel im Rahmen von RADOST untersucht.

Tabelle 7: Durch den Klimawandel veränderbare Photovoltaik-Parameter

Durch den Klimawandel veränderbare Photovoltaik-Parameter	
direkter Einfluss des Klimawandels	indirekter Einfluss des Klimawandels
<ul style="list-style-type: none"> • Globalstrahlung • Sonnenscheindauer • Lufttemperatur 	<ul style="list-style-type: none"> • gesetzliche Rahmenbedingungen zu Errichtung und Betrieb von PVA • Entwicklung der Technik und damit der Wirtschaftlichkeit der Stromerzeugung von PVA

4 Windkraft

Der Begriff Wind bezeichnet im Allgemeinen die Verlagerung von Luftteilchen in Bezug zu deren Geschwindigkeit und Richtung [34]. In Bewegung geraten die Luftteilchen durch Druckunterschiede in der Erdatmosphäre, die wiederum durch solare Einstrahlung entstehen. Windkraft ist also eine indirekte Form von Solarenergie [35].

Der Wind wird vom Menschen seit Jahrhunderten als Energiequelle für mechanische Antriebe und zur Fortbewegung genutzt. Als Folge der Ölkrise in den 70er Jahren und eines gestiegenen Umweltbewusstseins der Bevölkerung, wuchs die weltweite Nutzung der Windkraft zur Stromerzeugung in den letzten drei Jahrzehnten rapide an. Die moderne Windkrafttechnik hat sich zu einem starken Industrie- und Wirtschaftszweig entwickelt, der zurzeit mit der intensiven Weiterentwicklung von Offshore-Windkraftanlagen einen weiteren großen Fortschritt in der Energiebereitstellung aus erneuerbaren Energien anstrebt. Weltweit steht Deutschland derzeit mit ca. 25.777 MW installierter Leistung (Stand März 2010 [36]) im Bereich Windkraft nach den USA (35.159 MW) an zweiter Stelle.

Mit jeder neu errichteten Windkraftanlage (WKA) werden geeignete Flächen für den weiteren Ausbau der Windkraft knapp und neue Strategien zur Windkraftnutzung notwendig. Solche Strategien sind zum einen der Trend zum Repowering und zum anderen die „Auslagerung“ der WKA auf das Meer. Beide Maßnahmen bieten durch effizientere Technik und/oder bessere Standortbedingungen (offshore) das Potenzial für eine noch größere Energieausbeute. Durch Repowering z.B., werden ältere WKA durch neuere Modelle mit wesentlich mehr Leistung ersetzt. Zum Vergleich erbrachte eine WKA in den 90er Jahren maximal 2 MW Leistung, während eine WKA aktueller Bauart bereits 6 MW leisten kann.

Moderne WKA wandeln die kinetische Energie des Windes mit Hilfe von Generatoren in elektrische Energie um. Dabei gilt: Je stärker und konstanter der Wind weht, desto mehr Strom kann durch eine WKA erzeugt werden. Beste Windnutzungsbedingungen herrschen auf dem Meer (offshore). Über der nahezu ebenen Wasseroberfläche können die Winde ungebremst maximale Geschwindigkeiten entwickeln und über längere Zeitabschnitte konstant halten. Die durchschnittlichen Windgeschwindigkeiten über dem Meer sind folglich höher, als die über Land. Für die Nordsee werden in einem Bereich ca. 10 km von der Küste entfernt Windgeschwindigkeiten von 8 – 9 m/s angenommen [33]. Die Energieausbeute der Offshore-WKA kann so bis zu 40 % höher ausfallen als an Land [30].

An Land (onshore) hängt die Windgeschwindigkeit stark von Oberflächenbeschaffenheit bzw. Rauigkeit des Geländes ab. Je stärker die Bodenrauigkeit ausgeprägt ist, desto stärker wird der Wind abgebremst. Durch Bäume, Häuser, Antennenmasten oder andere in die Höhe ragende Hindernisse, erreicht die Windgeschwindigkeit nur langsam höhere Werte. Zudem erzeugen die Hindernisse Turbulenzen, die ungünstig auf die WKA einwirken können. Mit relativ flachem Gelände und wenig Landschaftsinventar bieten Küstenregionen sehr gute Bedingungen zur Windkraftnutzung. Aber auch im Binnenland können WKA effizient eingesetzt werden, wenn sie möglichst hoch gebaut werden. Denn mit wachsendem Abstand, nimmt der hemmende Einfluss der „rauen“ Geländeoberfläche auf den Wind ab.

Theoretisch kann durch eine WKA die im Wind enthaltene Strömungsenergie nur zu ca. 59,3 % genutzt bzw. entnommen werden. Dieser Wert wird Betzscher Leistungsbeiwert ($c_{p,Betz} = 0,593$) genannt. Die restlichen 40,7 % Windkraft bestehen zum einen aus der verbliebenen Bewegungsenergie nach dem Durchgang des Windes durch das Windrad und zum anderen aus dem Wind, der dem Windrad ausweicht und es verlustfrei umströmt. Der reale

Leistungsbeiwert einer WKA ist je nach Betriebsbedingung, lokalen Windverhältnissen und Bauart der WKA sehr unterschiedlich. I.d.R. liegt er bei $c_p = 0,45 - 0,51$, d.h. es werden ca. 70 – 85 % der theoretisch maximalen Leistung von $c_p = 0,59$ erreicht [30].

Aufgrund der langen Geschichte der Windkraftnutzung haben sich vielfältige Bauweisen von Windrädern entwickelt. Im Rahmen dieser Arbeit kann nicht auf alle Variationen eingegangen werden. Im Folgenden wird auf Basis der Angaben des Bundesverbandes Windkraft e.V. [30] die derzeit geläufigste Form von WKA grob beschrieben.

Grundsätzlich gliedern sich alle WKA (offshore/onshore) in die Bestandteile Fundament, Turm, Gondel und Rotor. Der konstruktive Aufbau von Fundament und Turm variiert je nach den gegebenen Standortbedingungen (Tragfähigkeit des Untergrundes, Witterungsverhältnisse, onshore/offshore). Als Fundamentformen für Onshore-Anlagen kommen Flach- oder Pfahlgründungen aus Stahlbeton, für Offshore-Anlagen Schwerkraftgründungen (Betonsenkästen), Stahlpfeiler oder Pfahlstrukturen mit Dreibein oder Fachwerkstruktur in Betracht. Als gängige Turmbauart hat sich derzeit der Stahlrohrturm durchgesetzt. Weitere Varianten sind abgespannte Masten und Gittertürme aus Stahl oder Betontürme aus Stahlbeton. Um mitunter extremen Witterungsverhältnissen standhalten zu können, müssen Fundament und Turm v.a. den Anforderungen an die Standsicherheit gerecht werden. Die wesentlichen Komponenten zur Energieerzeugung sind einerseits der Rotor, bestehend aus Nabe und Rotorblättern, und andererseits der in der Maschinengondel untergebrachte Generator und das Getriebe. Der Generator ist das Herzstück jeder WKA. Durch ihn wird die mechanische Energie des Rotors in elektrische Energie umgewandelt.

Der jährliche Stromertrag einer WKA richtet sich nach ihrer Nennleistung. Sie gibt die unter optimalen Betriebsbedingungen technisch maximal mögliche Leistung, die eine WKA je nach Bauart erbringen kann, an. Wesentlichen Einfluss auf die Nennleistung hat, neben dem Windangebot, die Dimensionierung der Anlage. Höhere Türme steigern generell die Energieproduktion einer WKA, da einerseits mit steigender Höhe stärkere und konstantere Windgeschwindigkeiten zur Verfügung stehen und andererseits größere Rotoren installiert werden können. Als Faustformel gilt, dass pro zunehmenden Meter Turmhöhe, mit je 1 % mehr Energieertrag gerechnet werden kann. Größere Rotorflächen können mehr Wind zur Energieproduktion nutzen. Eine Verdoppelung des Durchmessers bewirkt eine Vervierfachung der Fläche und folglich eine viermal größere verfügbare Windleistung.

Die Anzahl, der aerodynamisch optimal designten Rotorblätter, beträgt derzeit standardmäßig drei. Dies ist v.a. das Ergebnis der Gegenüberstellung der Kosten- und Leistungsdaten von WKA verschiedener Blattanzahl. Dreiblatt-Anlagen sind laufruhig und haben gute Wirkungsgrade. Hergestellt werden die langen und leichten Rotorblätter aus Verbundmaterialien wie Glas- oder Kohlenfaser. Um den Rotor der jeweiligen Windrichtung nachführen zu können, ist er samt Gondel drehbar auf dem Turm aufgelagert.

Die Investitionskosten einer WKA sind verhältnismäßig hoch. Je nach Anlagentyp (onshore/offshore), Erreichbarkeit des Standortes, Bodenbeschaffenheit, Aufwand für den Netzanschluss etc. betragen sie für Onshore-Anlagen ca. 1.200 €/kW und für Offshore-Anlagen zwischen 1.200 – 2.200 €/kW [31]. Für eine marktübliche 2 MW Onshore-Anlage belaufen sich die Investitionskosten schnell auf 2.400.000 Euro. Davon trägt die Windkraftanlage selbst mit 70 % den größten Anteil an den Investitionskosten bei. Etwa 50 % von diesem Anteil entstehen durch Materialkosten (Stahl, Kupfer etc.) und bis zu 30 % durch Arbeitskosten. Je nach Erreichbarkeit, Zustand und Auslastung des örtlichen Stromnetzes erreichen die Netzanschlussarbeiten einen Anteil von ca. 8 – 10 % an den

gesamten Investitionskosten. Die restlichen 20 – 22 % teilen sich auf die Kosten für das Fundament, die Montagearbeiten, das Grundstück und Sonstiges auf. Die Kostenstruktur einer durchschnittlichen Offshore-Anlage unterscheidet sich von der einer Onshore-Anlage. Die Kostenträger Grundstücke und Infrastruktur entfallen. Der Großteil von 92 % der Gesamtkosten verteilt sich annähernd gleichmäßig auf die Anlage, das Fundament, die Installation und den Netzanschluss. Der Restanteil von 8 % geht an sonstige anfallende Kosten [31].

Um die Wettbewerbsfähigkeit der Windkraftnutzung zu stärken, sind unbedingt Maßnahmen zur Effizienzsteigerung der Windturbinen und zur Senkung der Anlagen- und Stromgestehungskosten notwendig. Dazu gehören u.a. der Ausbau der Stromnetze zur Verbesserung der Netzqualität und der Netzanschlüsse sowie der Ausbau der bestehenden Infrastruktur, um den Transport der Anlagenteile zum finalen Standort zu erleichtern. Oft beeinträchtigen auch strenge umweltrechtliche Belange und langwierige bürokratische Prozesse die Rentabilität von WKA und erschweren Investoren den Weg in die Windkraftnutzung.

Bei der Planung von WKA ist eine Vielzahl rechtlicher Regelungen zu beachten. Im ersten Schritt ist meist die Erstellung einer gebietsbezogenen Planung durch die zuständige Gemeinde erforderlich. Die Gemeinden sind infolge der Regelungen des Baugesetzbuches (BauGB) dazu berechtigt, mithilfe von Flächennutzungs- und Bebauungsplänen, auf gemeindlicher oder regionaler Ebene Vorrangflächen bzw. Eignungsgebiete für die Windkraftnutzung auszuweisen. Diese Eignungsgebiete werden durch Ausschussverfahren bezogen auf die Ziele der Raumordnung und Landesplanung ermittelt. Dem Bau und Betrieb von Windkraftanlagen in solchen Gebieten stehen keine öffentlichen Belange, wie z.B. der Natur- und Landschaftsschutz, entgegen. Im zweiten Schritt, dem einzelfallbezogenen Genehmigungsverfahren, ist die Genehmigungsfähigkeit der Anlage zu prüfen. Genehmigungsvoraussetzung ist die Erfüllung bauplanungsrechtlicher und evtl. weiterer spezifischer Anforderungen, die sich aus tangierten Fachgesetzen (z.B. Luftverkehrsgesetz LuftVG, Straßenrecht etc.) ergeben. Im Mindesten benötigen WKA ab einer Gesamthöhe von 50 m, neben einer Baugenehmigung, einer Genehmigung durch das Bundesimmissionsschutzgesetz (BImSchG), in dessen Rahmen auch eine Umweltverträglichkeitsprüfung (UVP) erfolgen kann. I.d.R. sind mit der Erteilung der immissionsschutzrechtlichen Genehmigung alle Anforderungen berücksichtigt und keine weiteren Genehmigungen einzuholen [32].

4.1 Einordnung der Windkraft-Parameter nach ihrer Art der Einflussnahme

Die Höhe des Stromertrages einer WKA hängt unmittelbar von der vorherrschenden mittleren Windgeschwindigkeit am Standort ab. Je stärker und konstanter der Wind weht, desto besser stehen die Bedingungen für eine ertragreiche Windkraftnutzung. Stärke und Beständigkeit des Windes werden vorwiegend vom Geländere relief am Standort und dem vorhandenen Landschaftsinventar, bzw. der daraus resultierenden Geländerauigkeit, beeinflusst. Ebenfalls direkten Einfluss auf den Stromertrag einer WKA haben die technischen Parameter Anlagentechnik und –dimensionierung. Wie hoch die Ausschöpfung des natürlichen Windpotenzials durch eine WKA ist, wird durch den Wirkungsgrad angegeben. Dieser kann bei den gängigen Dreiblatt-Windkraftanlagen maximal bei 59 %

liegen (Betzscher Leistungsbeiwert) und wird zusätzlich durch Verluste bei der Umwandlung in elektrische Energie durch Rotor, Getriebe und Generator um ca. 25 – 30 % gemindert.

Indirekten Einfluss auf die Nutzung der Windkraft haben u.a. auch natürliche Parameter, die Einfluss auf den konstruktiven Aufbau einer WKA nehmen. Die Tragfähigkeit des Untergrundes nimmt entscheidenden Einfluss auf die Art der Fundamente. Anforderungen an die Standfestigkeit einer WKA entstehen durch direkte Krafterwirkungen des Windes und durch andere, durch den Wind ausgelöste Krafterwirkungen, wie z.B. starker Wellengang bei Offshore-Anlagen. Extreme Witterungsbedingungen beeinflussen die Wahl des Baumaterials. Dieses muss beständig gegen Frost, Hitze, Feuchtigkeit und den zerstörenden Einfluss anderer Stoffe, wie z.B. Meersalz, sein. Den, durch die oben genannten natürlichen Parameter entstehenden Anforderungen an die Standfestigkeit und Beständigkeit des konstruktiven Aufbaus einer WKA, soll durch die Einhaltung der geltenden technischen Richtlinien, Normen etc. entsprochen werden.

Transport, Montage und Netzanschluss von WKA sind sehr aufwendig durchzuführen und haben dadurch zwar indirekten, aber dennoch großen Einfluss auf die Nutzung von Windkraft. Der durch sie entstehende Kosten- und Arbeitsaufwand beeinflusst u.a. die Wirtschaftlichkeit der Windkraftnutzung. Die Wirtschaftlichkeit bzw. Rentabilität der Windkraftnutzung ist eines der wichtigsten Kriterien, die entscheidenden Einfluss auf die Bereitschaft zur Investition in die Windkraftnutzung haben. Um wettbewerbsfähig zu sein und sich auf dem Markt durchsetzen zu können, muss der Nutzen von Windkraftanlagen dauerhaft höher als der investierte Aufwand sein. Die Wettbewerbsfähigkeit der Windkraft wird derzeit noch enorm durch staatliche Fördermittel, Subventionen und v.a. durch die durch das EEG festgelegten Einspeisevergütungen getragen, ohne die die Stromgestehungskosten unrentabel hoch wären.

Neben der Wirtschaftlichkeit haben auch die rechtlichen Regelungen durch Ge- und Verbote indirekten Einfluss auf die Nutzung der Windkraft bzw. auf die Investoren der Windkraftnutzung. Die Gesetzgebung sieht u.a. die Berücksichtigung öffentlicher Belange, wie z.B. den Naturschutz, vor. Dies verfolgt sie einerseits durch die Standortermittlung mittels Ausschlusskriterien und andererseits durch die Prüfung der Umweltverträglichkeit der Anlagen. Zu beachten ist, dass zu strenge rechtliche Anforderungen und zu komplizierte und langwierige planungsrechtliche Prozesse abschreckend auf die Investoren wirken können.

Tabelle 8: Parameter mit direktem / indirektem Einfluss auf die Windkraftnutzung

	Kategorie	Parameter
indirekter Einfluss	Natur	<ul style="list-style-type: none"> • Bebaubarkeit (Tragfähigkeit) des geplanten Anlagenstandortes (onshore/offshore) • Krafterwirkungen durch Windstärken, Wellengang, etc. • Materialbeanspruchung durch Witterung (Frost, Nässe, Hitze) und Stoffeinträge (z.B. Meersalz)
direkter Einfluss		<ul style="list-style-type: none"> • mittlere Windgeschwindigkeit • Geländerauigkeit

	Kategorie	Parameter
	Technik	<ul style="list-style-type: none"> • Anlagenart • Anlagentechnik • Anlagendimensionierung • Betriebsführung
indirekter Einfluss	Recht	<ul style="list-style-type: none"> • Baugesetzbuch (BauGB) • Landesbaugesetze (LBauO) • Bundesnaturschutzgesetz (BNatSchG) • Bundesimmissionsschutzgesetz (BImSchG) • Seerecht bei Offshore-WKA
	Wirtschaft	<ul style="list-style-type: none"> • Investitionskosten (Transport, Montage, Netzanschluss ...) • Betriebskosten (Reparatur, Wartung, Versicherungen ...) • Erträge (Einspeisevergütung nach EEG) • Fördermittel (z.B. KfW-Programm Erneuerbare Energien)

4.2 Einfluss des Klimawandels auf die Windkraft-Parameter

Der Klimawandel wird auf alle Parameter Einfluss nehmen. Direkte Auswirkungen werden vorwiegend bei den natürlichen Parametern zu beobachten sein. Der Wind, als Hauptfaktor der Windkraftnutzung, wird Veränderungen in seiner Stärke, Geschwindigkeit und Häufigkeitsverteilung erfahren. Nach berechneten Klimamodellen ist für norddeutsche Regionen mit einer mäßigen Zunahme der mittleren Windgeschwindigkeiten, aber auch mit der Zunahme von intensiveren und häufiger auftretenden Stürmen zu rechnen [37].

Wind entsteht durch den Luftmassenausgleich zwischen Hochdruck- und Tiefdruckgebieten. Durch den Klimawandel herbeigeführte Temperaturveränderungen sind deshalb die Hauptursache für veränderte Windverhältnisse. Bereits jetzt treten als Folge des Klimawandels vermehrt Unwetter mit sehr hohen Windgeschwindigkeiten auf. Da der Stromertrag grundsätzlich von der durchschnittlichen Windgeschwindigkeit abhängt, ist die erhöhte Windstärke auf den ersten Blick ein Vorteil. Stürme mit hohen Windgeschwindigkeiten wirken sich aber eher kontraproduktiv auf die Windkraftnutzung aus. Sie treten nur unregelmäßig auf und sind meist so stark und turbulent, dass die WKA zur Sicherheit abgeschaltet werden müssen. Mäßig starke (ca. 10 m/s) und v.a. konstante Windgeschwindigkeiten bieten die günstigsten Bedingungen für die Stromproduktion durch eine WKA.

Der Einfluss des Klimawandels auf die Geländerauigkeit könnte indirekt über die Bodenfruchtbarkeit und dem damit zusammenhängenden Vegetationswachstum erfolgen. Ungünstige Klimaänderungen könnten eine Dezimierung von Waldbeständen, Gehölzgruppen, Feldhecken oder Einzelbäumen zur Folge haben. Auf die Windverhältnisse hätte dies einen positiven Effekt, da der Wind ohne größere Hindernisse gleichmäßiger und kräftiger wehen kann.

Indirekten Einfluss hat der Klimawandel auch auf die Parameter der rechtlichen und wirtschaftlichen Seiten der Windkraftnutzung. Die rechtlich geregelte Standortermittlung erfolgt durch den Ausschluss von Flächen, die öffentlichen Belangen nachkommen, wie z.B. Naturschutzgebiete. Im Laufe des Klimawandels können sich die Bedingungen, unter denen ein Gebiet als Naturschutzgebiet o.ä. ausgewiesen wird, verändern. Schutzgebiete o.a. Ausschlussgebiete könnten ihren Schutzstatus verlieren und andere bisher weniger schützenswerte Flächen werden als Schutzgebiet neu eingeordnet. Weiterhin kann durch die Notwendigkeit Erneuerbare Energien zu nutzen die rechtlichen Regelungen gelockert werden, wie es aktuell in Schleswig-Holstein der Fall ist. Dort trat am 03.02.2010 ein Erlass zur Planung von KleinWindkraftanlagen in Kraft, der die Errichtung von WKA bis zu einer Höhe von 30 m im Außenbereich und außerhalb der in der Regionalplanung festgelegten Vorranggebiete grundsätzlich erlaubt [36].

Die Wirtschaftlichkeit von Windkraftanlagen kann der Klimawandel indirekt zum einen dadurch beeinflussen, dass sich die Windverhältnisse bezogen auf den potenziellen Stromertrag günstig oder ungünstig verändern. Neben dem vom Wind abhängigen Stromertrag beeinflussen Witterungsverhältnisse den wirtschaftlichen Betrieb von WKA. Beispielsweise gefährdet die Vereisung der Rotorblätter die Stand- und Verkehrssicherheit von WKA. Dieses Risiko könnte durch mildere Winter sinken. Materialschäden durch starke Niederschläge (Hagel) und anderes Sturmgesehen sind dagegen durch den Klimawandel bedingt häufiger zu erwarten. Der Einfluss von Feuchtigkeit und Salz v.a. bei Offshore-Anlagen erhöht das Korrosionsrisiko. Solche und weitere Wirkfaktoren erhöhen erheblich die Reparatur- und Wartungskosten für WKA und beeinträchtigen infolge dessen die Wirtschaftlichkeit und die Stromgestehungskosten.

Für die Ableitung von Anpassungsstrategien wie z.B. die Verbesserung von Baumaterialien für WKA werden die in Tabelle 9 aufgeführten Faktoren im Hinblick auf ihre mögliche Veränderung durch den Klimawandel im Rahmen von RADOST untersucht.

Tabelle 9: Durch den Klimawandel veränderbare Windkraft-Parameter

Durch den Klimawandel veränderbare Windkraft-Parameter	
direkter Einfluss des Klimawandels	indirekter Einfluss des Klimawandels
<ul style="list-style-type: none"> • Wind (Stärken, Geschwindigkeiten, Häufigkeitsverteilungen) • Witterungseinflüsse 	<ul style="list-style-type: none"> • gesetzliche Rahmenbedingungen zu Errichtung und Betrieb von WKA • Entwicklung der Technik und damit der Wirtschaftlichkeit der Stromerzeugung durch WKA

5 Biogas

Biogas ist ein aus organischen Substraten (Biomasse) gewonnener Brennstoff, welcher in das Erdgasnetz eingespeist, in Blockheizkraftwerken (BHKW) zur Erzeugung von Strom und Wärme oder als Treibstoff in Kraftfahrzeugmotoren eingesetzt werden kann.

Das brennbare Gas wird in Biogasanlagen (BGA) durch den anaeroben mikrobiellen Abbau (Vergärung) von Biomasse produziert. Es entsteht jedoch auch auf Abfalldeponien, in Kläranlagen oder in Sümpfen und wird dementsprechend als Deponie-, Klär- oder Sumpfgas bezeichnet. In einer BGA läuft der natürliche Vergärungsprozess unter optimalen Bedingungen, kontrolliert und besonders effizient ab. Auf diesem Weg wird aus der Biomasse bzw. den Biogas-Substraten ein maximaler Biogas- und Methanertrag erzielt.

Als Biomasse im Sinne des EEG 2009 [38] gelten die Stoffe der Gruppen „Gülle“, „Biomasse nach Biomasseverordnung“ sowie „sonstige Biomasse“. Gülle oder auch Wirtschaftsdünger bezeichnet die in landwirtschaftlichen Betrieben anfallenden tierischen Exkrememente, die meist als Dünger auf Ackerflächen ausgebracht werden. Die Biomasseverordnung (BiomasseV) [39] definiert Biomasse als Energieträger aus Phyto- oder Zoomasse und unterscheidet dabei in für den Anwendungsbereich des EEG anerkannte und nicht anerkannte Biomasse (s. Tabelle 10). Zusätzlich zur BiomasseV hat der Gesetzgeber in der Anlage 2 zum EEG 2009 eine Positivliste III und eine Negativliste IV von Stoffen der BiomasseV erstellt. Die Stoffe der Positivliste werden auch als „nachwachsende Rohstoffe“ (NaWaRo) bezeichnet, bei deren Einsatz in einer BGA der sogenannte NaWaRo-Bonus erwirtschaftet werden kann. Strom, der aus sonstiger Biomasse erzeugt wurde, fällt nicht in den Geltungsbereich des EEG und wird daher auch nicht danach vergütet. Sonstige Biomasse ist Biomasse, die nicht der BiomasseV entspricht und auch nicht als Gülle bezeichnet werden kann.

Tabelle 10: Für den Anwendungsbereich des EEG anerkannte bzw. nicht anerkannte Biomasse gem. BiomasseV

anerkannte Biomasse (§ 2 BiomasseV)	nicht anerkannte Biomasse (§ 3 BiomasseV)
<ul style="list-style-type: none"> • Pflanzen und Pflanzenbestandteile sowie aus ihnen hergestellte Energieträger • Abfälle und Nebenprodukte pflanzlicher und tierischer Herkunft aus der Land-, Forst- und Fischwirtschaft • Bioabfälle • aus Biomasse durch Vergasung oder Pyrolyse erzeugtes Gas und daraus resultierende Folge- und Nebenprodukte • aus Biomasse erzeugte Alkohole • Altholz, sofern nicht durch § 3 BiomasseV ausgeschlossen • aus Altholz i.S. der BiomasseV erzeugtes Gas • Pflanzenölmethylester • Treibsel aus Gewässerpflege, Uferpflege und –reinhaltung • durch anaerobe Vergärung erzeugtes Biogas 	<ul style="list-style-type: none"> • fossile Brennstoffe sowie daraus hergestellte Neben- und Folgeprodukte • Torf • gemischte Siedlungsabfälle • durch PCB, PCT oder Quecksilber belastetes Altholz • Papier, Pappe, Karton • Hafenschlick und sonstige Gewässerschlämme und –sedimente • Textilien • Tierkörper, Tierkörperteile und Erzeugnisse, die nach dem Tierkörperbeseitigungsgesetz in Tierkörperbeseitigungsanstalten zu beseitigen sind und Stoffe, die aus deren Beseitigung entstanden sind • Deponiegas • Klärschlamm und -gas

Im Allgemeinen werden die für die Biogasproduktion verwendeten Substrate nach ihrer Herkunft unterteilt. Dies sind zum einen die aus der Landwirtschaft stammenden organischen Reststoffe (Abgänge der Tierhaltung und Pflanzenproduktion) sowie die NaWaRo und zum anderen organische Abfälle aus der Industrie, dem Gewerbe und den Kommunen (z.B. Bio-, Gastronomieabfälle, Altfett). Je nachdem, ob die zur Biogasproduktion eingesetzten Substrate landwirtschaftlicher Herkunft oder organische Abfälle sind, werden die Anlagen in landwirtschaftliche Biogasanlagen oder Abfallvergärungsanlagen unterschieden.

Durch das Inkrafttreten des EEG verbesserte sich die wirtschaftliche Situation für Betreiber landwirtschaftlicher bzw. NaWaRo-Biogasanlagen deutlich. Dagegen bietet das EEG für die Vergärung von sonstigen organischen Abfällen kaum neue wirtschaftliche Anreize. Das öffentliche Interesse an Abfallvergärungsanlagen steht deutlich hinter den landwirtschaftlichen Anlagen. Zudem ist der aktuelle Bestand an deutschen Kompostierungs- und Vergärungsanlagen an das mengenmäßige Aufkommen an biogenen Abfällen relativ gut angepasst, so dass aus wirtschaftlicher Sicht die Errichtung weiterer Anlagen weniger sinnvoll erscheint. Die weitere Entwicklung von Abfallvergärungsanlagen besteht in der Steigerung ihrer Effizienz durch Optimierung der Abfallaufbereitung sowie der Anlagentechnik und Prozesse [45]. Da diese Entwicklung relativ unabhängig vom Klimawandel abläuft, wird im Weiteren der Fokus auf die NaWaRo-Anlagen gerichtet.

In den NaWaRo-BGA kommen hauptsächlich zur Energieerzeugung angebaute Energiepflanzen zum Einsatz. Als Co-Fermente werden die sonstigen in Landwirtschaftsbetrieben anfallenden organischen Reststoffe wie z.B. Gülle verwendet. NaWaRo-BGA haben neben der Förderung durch das EEG u.a. den Vorteil, dass mit dem Anbau der Energiepflanzen als nachwachsender Rohstoff eine relativ konstante Versorgung der BGA mit Substraten gesichert ist und eine gewisse Unabhängigkeit vom regionalen Viehbestand besteht. Selbst in Regionen mit hohen Viehdichten sind die anfallenden Mengen an Gülle zu gering um wirtschaftliche Anlagengrößen zu erreichen. Dies liegt mitunter daran, dass Gülle bis zu 90 % aus Wasser besteht und sehr große Substratmengen für einen adäquaten Biogasertrag notwendig werden [48].

Theoretisch kann jede Pflanze als Energiepflanze genutzt werden. Für eine effiziente Biogasproduktion eignen sich v.a. ertrag- und energiereiche Pflanzen mit möglichst geringen langfaserigen und verholzten Anteilen, da die Bakterienflora herkömmlicher BGA Cellulose nicht aufspalten kann [45]. Energiepflanzen sind z.B. Futterrüben, Mais, Sudangras, Triticale, Winterroggen, Winterweizen und Zuckerhirse [40]. Der zu erwartende Biogas- und Methanertrag ist u.a. von der Pflanzenart, der Sorte, dem Anbaustandort, dem Erntezeitpunkt sowie der Qualität der Konservierung der Substrate (z.B. Silierung) abhängig.

Energiepflanze Nr. 1 in Deutschland ist der Silomais [51]. Mit einem durchschnittlichen Biogasertrag von ca. 202 m³/tFM (FM = frische Biomasse) und gleichzeitigem Methangehalt von 52 % ist der Silomais sehr ertragreich. Der energetische Wert von Biogas steht in direktem Zusammenhang mit seinem Methangehalt. Ein Kubikmeter (1 m³) Methan hat einen Energiegehalt von knapp zehn Kilowattstunden (9,97 kWh). Ein Methananteil von 52 % im Biogas entspricht einem Energiegehalt von ca. 5,2 kWh pro Kubikmeter (1 m³) Biogas. Der durchschnittliche Heizwert von einem Kubikmeter Biogas kommt damit einem Heizwert von 0,52 l Heizöl gleich [41].

Die Zusammensetzung von Biogas variiert je nach Nährstoffzusammensetzung des Ausgangssubstrats, der Prozessführung in der Vergärungsanlage sowie je nach Substrattemperatur. Im Durchschnitt enthält Biogas ca. 60 % Methan. Danach folgt Kohlendioxid mit ca. 35

%). Außerdem sind in geringeren Mengen Wasserdampf, Sauerstoff, Stickstoff, Ammoniak und weitere Spurengase im Biogas enthalten (s. Tabelle 11).

Tabelle 11: Durchschnittliche Zusammensetzung von Biogas [41]

Bestandteil	Formelzeichen	Konzentration
Methan	CH ₄	50 – 75 Vol.-%
Kohlendioxid	CO ₂	25 – 45 Vol.-%
Wasser	H ₂ O	2 – 7 Vol.-%
Sauerstoff	O ₂	< 2 Vol.-%
Stickstoff	N ₂	< 2 Vol.-%
Ammoniak	NH ₃	< 1 Vol.-%
Wasserstoff	H ₂	< 1 Vol.-%
Schwefelwasserstoff	H ₂ S	< 1 Vol.-%

Der Biogaserzeugung in einer BGA liegt der natürliche, biologische Prozess des Verfaulens zu Grunde. Die biochemische Umwandlung der organischen Substrate in Biogas verläuft in den vier Phasen Hydrolyse, Versäuerung, Essigsäurebildung und Methanbildung. Diese Phasen können zeitlich und räumlich nebeneinander in einem Prozessbehälter (Fermenter) stattfinden. Das Biogas entsteht dabei als ein Stoffwechselprodukt von Bakterien, die unter bestimmten Lebensbedingungen (z.B. sauerstofffreie (anaerobe) Umgebung, konstante Prozesstemperaturen) die feuchte Biomasse zersetzen. Für eine möglichst große Ausbeute an hochwertigem, das heißt methanhaltigem Biogas, müssen die Lebensbedingungen für die am Prozess beteiligten Bakterien optimal gestaltet werden. Dies wird durch den Einsatz verschiedener, auf das Ausgangssubstrat abgestimmter Anlagen- und Verfahrenstechniken in einer BGA angestrebt.

Alle Komponenten, einer meist schlüsselfertig gebauten BGA, sind genau aufeinander abgestimmt und überwiegend automatisiert. Das Kernstück jeder BGA ist ein luftdicht abschließbarer Behälter aus Kunststoff, Stahl oder Beton (Fermenter). In ihm wird die Biomasse vergoren und das Biogas gewonnen. Der Fermenter ist wärmeisoliert und wird beheizt. Über eine Beschickungsanlage mit Wiegesystem wird er geregelt mit Substrat befüllt. Ein Rührwerk durchmischt konstant die Biomasse, damit sie sich nicht entmischt und das entstandene Biogas leichter aus dem Substrat entweichen kann. Über Gasleitungen wird das gewonnene Biogas in Gasspeicher weitergeleitet. Anschließend kann es entweder zur unmittelbaren Energieproduktion in einem BHKW genutzt oder nach der Biogasaufbereitung (z.B. Entwässerung, Entschwefelung) in ein vorhandenes Erdgasnetz eingespeist oder als Motorentreibstoff eingesetzt werden.

Ein BHKW wandelt z.B. durchschnittlich 35 bis 40 % der eingesetzten Energie in Strom um, weitere 50-55 % werden in Wärme umgewandelt. Beim Einsatz von Biomethan in einer Gastherme können Wirkungsgrade bis zu 90 % bezogen auf die gewonnene Kilowattstunde erzielt werden. Dabei wird jedoch kein Strom produziert. Den niedrigsten Wirkungsgrad (< 30 %) erzielt Biomethan bei Verwendung als Treibstoff in Kraftfahrzeugen. Die Reichweite liegt bei ca. 67.000 km pro Hektar und die CO₂-Bilanz ist besser als beim Einsatz herkömmlicher Treibstoffe [55].

Die Errichtung und der Betrieb einer BGA in Deutschland unterliegen einer Vielzahl rechtlicher Anforderungen. Es bedarf wie bei jeder Errichtung oder Änderung einer baulichen Anlage im Mindestfall einer baurechtlichen Genehmigung. Die baurechtliche Zulässigkeit einer BGA ist von den bauplanungs- und bauordnungsrechtlichen Regelungen des Baugesetzbuches (BauGB) und den von den Ländern erlassenen Landesbauordnungen (LBauO) abhängig. Die bauordnungsrechtlichen Regelungen der LBauO stellen Anforderungen an die Gestaltung einer BGA z.B. bezüglich des Brandschutzes oder der Arbeitssicherheit [42].

Durch die bauplanungsrechtlichen Regelungen des BauGB wird geklärt, ob die Anlage am geplanten Standort errichtet werden darf. Dabei ist zu unterscheiden ob der gewählte Standort sich im Geltungsbereich eines Bebauungsplans, im unbeplanten Innenbereich oder im Außenbereich befindet. Innerhalb eines B-Planbereiches ist die Errichtung einer BGA immer dann zulässig, wenn dies den Festsetzungen des B-Plans entspricht bzw. wenn der B-Plan dahingehend geändert oder neu aufgestellt werden kann. Im unbeplanten Innenbereich kann die Errichtung einer BGA zugelassen werden, wenn sie sich nach Art und Maß der baulichen Nutzung in die Umgebung eingliedern kann. Dies ist der Fall, wenn die Gebietsstruktur des Standorts dem Erscheinungsbild eines reinen Gewerbe- oder Industriegebiets entspricht. Im Außenbereich sind seit der letzten Novelle des BauGB bestimmte BGA privilegiert zulässig, wenn ihrer Errichtung keine öffentlichen Belange entgegenstehen und die ausreichende Erschließung gesichert ist. Nach § 35 Abs. 1 Nr. 6 BauGB muss eine BGA folgende Voraussetzungen erfüllen um privilegiert zu sein.

- Die BGA steht in einem räumlich-funktionalen Zusammenhang mit dem Betrieb.
- Die Biomasse stammt überwiegend aus dem Betrieb oder überwiegend aus diesem und aus nahe gelegenen Betrieben.
- Es wird je Hofstelle oder Betriebsstandort nur eine BGA betrieben.
- Die installierte elektrische Leistung der BGA überschreitet nicht 0,5 MW.

Wird durch die geplante BGA eine der vorgenannten Anforderungen nicht erfüllt, erhält sie zwar keinen Privilegiertenstatus, kann aber bei Einhaltung der allgemeinen Voraussetzungen des § 35 Abs. 2 BauGB trotzdem zugelassen werden. Der Bauantrag ist bei der zuständigen Behörde (meist die Bauämter der Landkreise) einzureichen. Die Durchführung eines Baugenehmigungsverfahrens dauert i.d.R. 2 bis 5 Monate.

Neben den baurechtlichen Bestimmungen sind bei der Errichtung und dem Betrieb einer BGA auch die immissionsschutzrechtlichen Anforderungen nach dem Bundesimmissionsschutzgesetz (BImSchG) zu beachten. Gleichwohl das Genehmigungsverfahren für eine BGA unter bestimmten Umständen entweder nach dem BauGB (Baugenehmigung) oder nach dem BImSchG (immissionsschutzrechtliches Genehmigungsverfahren) abzulaufen hat.

Abhängig von der Feuerungswärmeleistung des BHKW, der Art und Menge der Einsatzstoffe sowie der Größe der Endlagerbehälter unterliegt die Errichtung einer BGA dem BImSchG. Ein immissionsschutzrechtliches Genehmigungsverfahren ist bei der Überschreitung folgender Schwellenwerte einzuleiten, die sich aus den Regelungen der vierten Verordnung über genehmigungsbedürftige Anlagen (4. BImSchV) ergeben:

- Einsatz und Lagerung nicht besonders überwachungsbedürftiger Abfälle mehr als 10 t / Tag

- Bau und Betrieb der BGA im Zusammenhang mit einer genehmigungsbedürftigen Tierhaltungsanlage (z.B. > 2.000 Schweinemastplätze)
- Fassungsvermögen der vorhandenen Güllelager mehr als 2.500 m³
- Feuerungswärmeleistung des angeschlossenen BHKW höher als 1 MW.

Laut den Anforderungen des BImSchG ist eine BGA so zu errichten und zu betreiben, dass von ihr keine schädlichen Umweltauswirkungen ausgehen können. Als schädliche Umweltauswirkung gelten Immissionen (z.B. Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen, Licht, Wärme, Strahlen u.ä.) die nach Art, Ausmaß oder Dauer geeignet sind, Gefahren, erhebliche Nachteile oder erhebliche Belästigungen für die Allgemeinheit oder die Nachbarschaft herbeizuführen [44]. Bei einer BGA handelt es sich in diesem Sinne vorwiegend um Lärm- oder Geruchsimmissionen. Richt- und Grenzwerte zu Lärm- und Geruchsimmissionen werden in den Technischen Anleitungen (TA) zu Lärm und Luft sowie in der Geruchsimmissionsrichtlinie (GIRL) vorgegeben.

Neben der planungsrechtlichen Zulässigkeit einer BGA an einem bestimmten Standort sind bei der Standortwahl weitere Kriterien zu prüfen. So sind durch eine naturschutzrechtliche Vorprüfung des Standortes mögliche Beeinträchtigungen von Schutzgebieten zu erfassen und abzuwägen. Ausgeschlossen sind beispielsweise die Errichtung und der Betrieb einer BGA in Natura 2000-Gebieten. Den wasserrechtlichen Anforderungen an den Standort entsprechend, sind die Errichtung und der Betrieb einer BGA in Wasserschutz-, Wassereinzugs- und Überschwemmungsgebieten i.d.R. nicht erlaubt. Weiterhin ist zu ständig wasserführenden Gewässern ein Mindestabstand von 50 m einzuhalten. Die Unterkante des tiefsten Bauteils soll mind. 1 m über dem höchsten zu erwartenden Grundwasserspiegel liegen. Der Abstand zu bestehenden Brunnen, die der privaten Trinkwasserversorgung dienen, muss mind. 50 m betragen.

Diese und weitere Anforderungen an den Standort sowie an die Bau- und Betriebsweise einer BGA ergeben sich aus der Vielzahl dazu erlassener Gesetze, Verordnungen, Richtlinien und Normen wie sie auszugsweise in Tabelle 12 einzusehen ist.

Tabelle 12: Auswahl rechtlicher Rahmenbedingungen für die Errichtung und den Betrieb einer BGA

- | |
|--|
| <ul style="list-style-type: none">• Baugesetzbuch (BauGB)• Landesbauordnungen (LBauO)• Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG)• Vierte Verordnung über genehmigungsbedürftige Anlagen (4. BImSchV)• Verordnung zur Verhütung übertragbarer Krankheiten (EU Hygiene-V)• Bioabfallverordnung (BioAbfV)• Wasserhaushaltsgesetz (WHG)• Landeswassergesetze (LWG)• Bundesnaturschutzgesetz (BNatSchG)• Landschaftsgesetze der Länder (LG)• Düngeverordnung (DüV)• Düngemittelgesetz (DüMG)• Düngemittelverordnung (DüMV)• Biomasseverordnung (BiomasseV) |
|--|

Im Sinne einer wirtschaftlichen Betriebsweise von BGA sollten die Regelungen des EEG beachtet werden. Als effektives Förderinstrument der Bundesregierung im Hinblick auf den weiteren Ausbau des Anteils der Erneuerbaren Energien an der Stromproduktion bietet es den Anlagenbetreibern finanzielle Unterstützung in Form von Einspeisevergütungen und Bonuszahlungen.

Das EEG regelt u.a. die Rechte und Pflichten des Anlagen- und Netzbetreibers sowie die Abnahme und Höhe der Vergütungssätze für Strom aus erneuerbaren Energien, der in das öffentliche Netz eingespeist wird. Die Grundvergütung nach dem § 64 Abs. 1 Nr. 2 EEG 2009 für Strom aus Biomasse beträgt je nach installierter elektrischer Leistung der Biogasanlage zwischen 7,79 und 11,67 Cent/kWh (20 MW - 150 kW-Anlagen). Zusätzlich werden unter Einhaltung bestimmter Vorgaben weitere Aufschläge in Höhe von 1 bis zu 7 Cent/kWh gezahlt. Diese ergeben sich z.B. aus dem:

- NaWaRo-Bonus (Stromproduktion ausschließlich aus NaWaRo, Gülle und/oder Schlempe),
- KWK-Bonus (Kraft-Wärme-Kopplung, bei kombinierter Produktion von Strom und Wärme und gleichzeitiger Wärmenutzung) und dem
- Technologie-Bonus (bei Einsatz innovativer Technologien, nur in Verbindung mit Kraft-Wärme-Kopplung).

Die Vergütung für EEG-Strom aus einer BGA ist für 20 Jahre zzgl. des Jahres der Inbetriebnahme garantiert. Sie nimmt den überwiegenden Teil am Gesamterlös einer BGA ein und beeinflusst damit wesentlich die Rentabilität der BGA. In diesem Sinne ist die Wirtschaftlichkeit einer BGA vorwiegend von der Qualität und Quantität des produzierten Biogases abhängig. Neben den Erlösen aus der Stromvergütung können weiterhin Einnahmen durch den Verkauf von Wärme und des Gärrückstandes als Dünger erzielt werden. Möglich sind auch Entsorgungserlöse aus dem Einsatz von außerbetrieblichen Co-Substraten, z.B. Bioabfall. Positiv auf die Wirtschaftlichkeit wirken sich auch die Ersparnisse durch die Deckung des Eigenbedarfs an Substraten, Strom, Wärme und Dünger aus der eigenen Produktion.

Kosten entstehen einerseits durch die Investition und andererseits durch den Betrieb einer BGA. Die Investitionskosten für eine BGA hängen stark von der Anlagengröße ab. Sie verringern sich deutlich mit zunehmender Anlagengröße und damit einhergehender Zunahme des Automatisierungsgrades. Im Durchschnitt betragen sie zwischen ca. 3.000 € und 4.000 € je Kilowatt installierter Leistung [47]. Die Betriebskosten setzen sich i.A. zusammen aus den Abschreibungen, Zinsen, Versicherungsbeiträgen, Reparatur- und Wartungskosten sowie den Erzeugungs- und/oder Beschaffungskosten für die notwendigen Betriebsstoffe bzw. Biogas-Substrate. Dabei können Kosten gemindert werden, wenn darauf geachtet wird, dass mögliche Lieferanten von Substraten in unmittelbarer Nähe zum Anlagenstandort angesiedelt sind. Dies gilt ebenfalls für die Abnehmer der Endprodukte Strom, Wärme und Dünger.

5.1 Einordnung der Biogas-Parameter nach ihrer Art der Einflussnahme

Unmittelbaren Einfluss auf die Produktion von Biogas haben einerseits die eingesetzten Substrate und andererseits der Produktionsprozess innerhalb der BGA. Die Menge und Qualität (Methangehalt) der Biogasausbeute hängt wesentlich vom Gasbildungspotenzial der

Substrate ab. Das Gasbildungspotenzial steigt mit zunehmendem Anteil der organischen Trockenmasse (OTS) je Gesamtmasse eines Substrats. Die OTS besteht vorwiegend aus den Nährstoffen Protein, Fett und Kohlenhydrate. Das Fett liefert die höchste Methanausbeute.

Energiepflanzen zeichnen sich durch eine relativ hohe Methanausbeute gemessen pro Hektar Agrarfläche aus. Erreichbar sind Methanerträge von 2.522 m³ CH₄/ha (Weizenkörner) bis zu 5.530 m³ CH₄/ha (Maissilage). Dennoch schwanken die Werte für den spezifischen Gasertrag bei gleichem Substrat und Bedingungen aus noch unerforschten Gründen. Aus diesem Grund sind die derzeit in der Literatur auffindbaren Angaben zu Biogaserträgen nur als Richtwerte zu verstehen [47].

Als Parameter mit direktem Einfluss auf die Biogasproduktion sind auch die natürlichen und technischen Aspekte beim Anbau der Energiepflanzen zu nennen. Je nach klimatischen Bedingungen und vorherrschenden Bodenverhältnissen eignen sich verschiedene Pflanzensorten zum Anbau. Zusammen mit den geeigneten Anbau- und Ernteverfahren variieren Ernteertrag und Nährstoffzusammensetzung der Pflanzen, die wiederum direkt das Biogasbildungspotenzial der Energiepflanzen bestimmen.

In der praktischen Herstellung ergeben sich Schwankungen der Biogasausbeuten nicht nur durch das jeweilige Biogaspotenzial der eingesetzten Substrate sondern auch und v.a. durch die vielzähligen Variationen der verfahrenstechnischen Parameter. Angefangen beim Anbau- und Ernteverfahren der Energiepflanzen, der Lagerung und Aufbereitung der Substrate, über den Gärprozess innerhalb des Fermenters bis hin zur Restgasnutzung aus dem Gärrückstandslager können nur kleine Veränderungen der Parameter zu großen Unterschieden in der Biogasausbeute führen. Um eine BGA fehlerfrei und wirtschaftlich zu betreiben, müssen die Bauteile und Prozesse aufeinander und v.a. auf die Einsatzsubstrate abgestimmt sein [54].

Indirekt wird das technische Potenzial der Biogasproduktion durch die gesetzlichen Rahmenbedingungen sowie durch wirtschaftliche Entscheidungen beeinflusst. Eine Vielzahl Gesetze, Verordnungen, Richtlinien und Normen stellen Anforderungen an den Standort, die Errichtung und den Betrieb einer BGA. Sie regeln, beschränken oder begünstigen dabei durch Verbote, Gebote oder Fördermaßnahmen die potentielle Biogasproduktion. Beispielsweise erlebte die Biogasproduktion in Deutschland insbesondere durch die Förderung durch das EEG einen enormen Aufschwung. So entwickelte sich die Anzahl der BGA deutschlandweit in den letzten 10 Jahren von knapp 1.000 Anlagen im Jahr 1999 auf rund 4.500 Anlagen Ende des Jahres 2009. Davon nutzen rund 95% landwirtschaftliche Substrate (Gülle, Mist, NaWaRo) zur Energieproduktion [41]. Kommunal eingesammelte Bioabfälle oder organische Abfälle aus Gewerbe und Industrie werden meist aus wirtschaftlichen Gründen kaum zur Biogasproduktion eingesetzt, da diese Substrate in ihrer Zusammensetzung und damit in ihrem Biogasbildungspotenzial stark schwanken. Weiterhin müssen verdorbene Speiseabfälle vor der Vergärung hygienisiert werden, was einen zusätzlichen Arbeits- und Kostenaufwand bedeutet.

Wirtschaftliche Entscheidungen nehmen indirekt Einfluss auf die Quantität und Qualität der möglichen Biogasproduktion. Kostenfragen beeinflussen oft die Entscheidung über die mögliche Investition und die technische Ausgestaltung einer BGA. Dabei geht es um die Investitions- und Betriebskosten sowie die möglichen Einnahmen, die u.a. abhängig sind von Faktoren wie Anlagengröße, Herkunft und Verfügbarkeit der Einsatzstoffe, Verwertung bzw. Verkauf der Endprodukte, aber auch die Infrastruktur, Strom- und Netzanschlüsse wie auch -

kapazitäten und im weiteren Sinne auch die Finanzierung von Forschungen zur Optimierung der Biogasbereitung.

Tabelle 13: Parameter mit direktem / indirektem Einfluss auf die Biogasproduktion

	Kategorie	Parameter
direkter Einfluss	Natur	<ul style="list-style-type: none"> • Biomasse (Zoo- und Phytomasse aus Land- und Abfallwirtschaft) • Biogaspotenzial von Biogas-Substraten (Nährstoffzusammensetzung) • Anbau der NaWaRo (Standorteignung: Sorte, Klima (Temperaturen, Niederschläge), Boden) • Vergärung (biochemische Umwandlung) als natürlicher Prozess
	Technik	<ul style="list-style-type: none"> • Anlagenart • Anlagendimension • Verfahrenstechnik • Betriebsführung
indirekter Einfluss	Recht	<ul style="list-style-type: none"> • Baugesetzgebung (BauGB, LBauO ...) • Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG) • Biomasseverordnung • weitere siehe Tabelle 12
	Wirtschaft	<ul style="list-style-type: none"> • Investitionskosten (Bau, Netzanschluss ...) • Betriebskosten (Substratkosten, Arbeitszeitbedarf, Versicherungen ...) • Erträge (Verkauf von Gas, Strom, Wärme, Dünger) • Fördermittel (z.B. Vergütung und Boni nach EEG)

5.2 Einfluss des Klimawandels auf die Biogas-Parameter

Die globale Erwärmung aufgrund der wachsenden Treibhausgas-Konzentration in der Atmosphäre ist der Hauptmotor des stattfindenden Klimawandels. Veränderte Niederschlagsverhältnisse, Extremwetterereignisse und Meeresspiegelanstieg sind nur einige der Folgen des Klimawandels. Für die Ostseeküste und das nordostdeutsche Tiefland berechnen regionale Klimamodelle [50] u.a. eine besonders starke Abnahme der sommerlichen Niederschläge. In den schon heute von Trockenheit betroffenen nordöstlichen Regionen Deutschlands könnte dies v.a. im Hinblick auf die Landwirtschaft und Wasserwirtschaft problematisch werden.

Die Landwirtschaft als ein Substratlieferant ist von größerer Bedeutung für die Biogasproduktion. Obwohl in den Küstenregionen der Nord- und Ostsee aufgrund der Nähe zum Meer und des relativ ausgeglichenen und gemäßigten Küstenklimas ein vergleichsweise geringer Temperaturanstieg zu erwarten ist, wird bei fehlender Anpassung u.a. mit verminderten Ernteerträgen als eine Folge des Klimawandels in der Landwirtschaft zu rechnen sein. So verursachte beispielsweise laut dem Umweltbundesamt (UBA) [49] der besonders heiße und trockene Sommer im Jahre 2003 in Brandenburg Ertragseinbußen von 40 % im Verhältnis zum langjährigen Mittel. Solche Ertragseinbußen beeinträchtigen erheblich die Wirtschaftlichkeit von BGA, die vorwiegend Substrate aus der Landwirtschaft bzw. NaWaRos einsetzen.

Andererseits führen voraussichtlich mildere Winter und weniger Frosttage im Frühjahr zu einer Verlängerung der Vegetationsperioden. Bei einem moderaten Temperaturanstieg und ausreichender Wasserversorgung würde dies sogar ein höheres Ertragspotenzial für viele Pflanzensorten bedeuten. Als Beispiel ist hier Schleswig-Holstein zu nennen, wo sich im Gegensatz zu Brandenburg durch die hohen Temperaturen im Jahr 2003 Ertragssteigerungen in Höhe von 8 % ergeben haben [49]. Dies zeigt, dass der Klimawandel regional stark unterschiedliche Auswirkungen hat.

Anpassungsmaßnahmen der Landwirtschaft an den Klimawandel werden voraussichtlich den Anbau angepasster Sorten und neuer Fruchtarten sowie die Anpassung der Anbauverfahren beinhalten. Pflanzen, die klimatisch gemäßigte Standorte bevorzugen (sog. C3-Pflanzen) wie Sonnenblumen, Kartoffeln, Raps und Getreide könnten zukünftig von Wärme liebenden Pflanzen (sog. C4-Pflanzen) wie Soja, Hirse und Mais von den deutschen Feldern verdrängt werden und damit das Angebotsspektrum der zur Biogasherstellung geeigneten Energiepflanzen verschieben. Als vielversprechende Sorte gelten Sorghumhirsen, die an warmen und trockenen Standorten ein vergleichbares Ertragsniveau wie Mais erreichen können [51].

Auch auf den Bedarf an Gärrückständen als Düngemittel könnte der Klimawandel Auswirkungen haben. Durch höhere CO₂-Gehalte in der Luft, die einen zusätzlichen Düngungseffekt auf die Pflanzen haben, könnte der herkömmliche Einsatz von Düngemitteln verringert werden. Unter optimalen Licht-, Nährstoff- und Wasserverhältnissen kann eine Erhöhung des atmosphärischen CO₂-Gehalts zu Ertragssteigerungen in der Pflanzenproduktion führen [49].

Der Einfluss des Klimawandels auf die landwirtschaftliche Produktivität wirkt sich also sehr stark auf die Wirtschaftlichkeit einer BGA und damit auf die potenzielle Erzeugung von Biogas aus. Ertragseinbußen und Verteuerung der landwirtschaftlichen Produkte sowie die Nutzungskonflikte der Energiepflanzenproduktion mit dem Naturschutz und der Lebensmittelproduktion sind mögliche Hemmnisse der Biogasproduktion.

Wasserwirtschaftliche Veränderungen werden sich auf die bestehende Wassergesetzgebung auswirken, was wiederum Auswirkungen auf die Standortplanung von BGA haben wird. Die Errichtung und der Betrieb von BGA werden durch rechtliche Rahmenbedingungen gesteuert. Unter anderem ist die Errichtung einer BGA innerhalb von Wasser- oder Naturschutzgebieten ausgeschlossen bzw. stark reglementiert. Klimawandelbedingt könnten sich die Grenzen solcher Schutzgebiete verändern und damit neue Baugebiete für BGA eröffnen.

Aufgrund der mit dem Klimawandel einhergehenden Temperaturerhöhung, Zunahme der Trockenheit und der CO₂-Erhöhung wird mit hoher Wahrscheinlichkeit ein bedeutender Anteil der heimischen Flora und Fauna einschließlich der heute für den Naturschutz besonders bedeutsamen Arten starken Veränderungen in Häufigkeit und Verbreitungsareal in Deutschland unterliegen. Diese Veränderungen können sowohl die Abnahme und regionales Aussterben als auch die Zunahme bzw. Neueinwanderung von Arten bedeuten. Im Allgemeinen werden hohe Biodiversitätsverluste sowie Veränderungen an den Arealgrenzen heimischer Pflanzen- und Tierarten zu erwarten sein [7]. In Folge dessen müssen die Schutzziele und evtl. die Grenzen ausgewiesener Naturschutzgebiete an die veränderten Gegebenheiten angepasst werden. In der Konsequenz kann dies einerseits die Lockerung

bzw. Aufgabe und andererseits die Neubildung von Naturschutzgebieten und damit einhergehend Veränderungen in der Raumplanung bedeuten.

Nicht zuletzt hat der Klimawandel auch auf die Nutzung von Biogas den Einfluss, dass durch ihn die Nutzung der erneuerbaren Energien unumstritten notwendig ist und sein wird. Der steigende Energiebedarf z.B. durch vermehrte Klimatisierungsanwendungen in den wärmer werdenden Sommermonaten erfordert die Weiterentwicklung und Optimierung der Biogasproduktion und der Verwendung von Biogas v.a. auch in den noch zurückhaltenden Bereichen der Gaseinspeisung und der Verwendung von Biogas als Kraftstoff.

Für die Ableitung von Anpassungsstrategien zur Produktion und Nutzung von Biogas werden die in Tabelle 14 aufgeführten Faktoren im Hinblick auf ihre mögliche Veränderung durch den Klimawandel im Rahmen von RADOST untersucht.

Tabelle 14: Durch den Klimawandel veränderbare Parameter der Biogasproduktion

Durch den Klimawandel veränderbare Biogas-Parameter	
direkter Einfluss des Klimawandels	indirekter Einfluss des Klimawandels
<ul style="list-style-type: none"> • landwirtschaftliche Produktivität • Biogaspotenzial von Biogas-Substraten 	<ul style="list-style-type: none"> • gesetzliche Rahmenbedingungen zu Errichtung und Betrieb von BGA • Wirtschaftlichkeit der Erzeugung und Nutzung von Biogas

6 Parameter-Matrix

Die Parameter-Matrix (s. Tabelle 15) dient der übersichtlichen Darstellung der Ergebnisse des vorliegenden Berichts zum Arbeitspaket 1.7.1 „Ermittlung relevanter Umweltparameter in Abhängigkeit der Erneuerbaren Energien und durch den Klimawandel hervorgerufene Entwicklungen“.

Aus der Parameter-Matrix kann der Betrachter den Einfluss der Parameter aus den Kategorien Natur, Technik, Recht und Wirtschaft auf die oben genannten erneuerbaren Energien ableiten. Dabei wird einerseits nach der Art der Einflussnahme (direkt / indirekt) sowie nach der Bedeutung (keine bis große Bedeutung) der Parameter für die Nutzung der jeweiligen erneuerbaren Energien unterschieden.

Die **natürlichen Parameter** bestimmen das theoretisch nutzbare Potenzial der Energieformen an einem bestimmten Standort (Standortplanung). Das theoretische Potenzial der Energiequellen besteht unabhängig von geeigneten technischen Methoden zur Nutzbarmachung sowie von nicht-technischen Voraussetzungen wie die rechtlichen und wirtschaftlichen Parameter. Das theoretische Energiepotenzial ist damit weit größer als die real nutzbare Energiemenge. Die Bedeutung der natürlichen Parameter variiert je nach untersuchter Energieform.

Die (Anlagen-) **Technik** bestimmt das technische Potenzial und damit den Anteil am theoretischen Energiepotenzial, welcher mit dem heutigen Stand der Technik nutzbar gemacht werden könnte (Anlagenplanung). Die technischen Parameter, als Bindeglied zwischen der natürlichen Energiequelle und der energetischen Nutzung durch den Menschen, sind bei allen untersuchten Energieformen von großer Bedeutung.

Natürliche und technische Parameter nehmen direkt Einfluss auf die Nutzung der erneuerbaren Energien. Indirekten Einfluss üben dagegen die rechtlichen und wirtschaftlichen Parameter aus.

Die Bedeutung der **rechtlichen Parameter** variiert je nach Energieform. Gesetzliche Festlegungen aus den Bereichen Bau- und Planungsrecht, Umweltschutz- und Technikrecht sowie Energierecht beeinflussen die Nutzung der erneuerbaren Energien auf indirekte Art. Die gesetzlichen Vorgaben beeinflussen nicht das theoretische oder das technische Potenzial der Energien, sondern steuern die Standort- und Anlagenplanung u.a. nach strukturellen und ökologischen Gesichtspunkten.

Wirtschaftliche Parameter haben, unabhängig vom natürlichen und technischen Potenzial, sehr großen Einfluss auf die Nutzung erneuerbarer Energien. Der Einfluss besteht v.a. in der Abhängigkeit möglicher Investitionen von der Bereitschaft und / oder dem finanziellen Background der Investoren sowie auch der Abnehmer der erzeugten Energie. Eine entscheidende Kennzahl sind hierbei die sogenannten Stromgestehungskosten, die aus der Höhe der Investitions- und Betriebskosten sowie aus der Höhe der Energieerträge resultieren.

Tabelle 15: Parameter-Matrix, Zusammenstellung der Parameter und Erneuerbaren Energien

	PARAMETER	Bedeutung der Parameter für die einzelnen Energieformen			
		Ao-Geo	PV	WK	BG
direkter Einfluss auf die Nutzung der Energie	NATUR				
	Sonneneinstrahlung / Strahlungsstärke / Globalstrahlung	I	III	0	II
	Sonnenscheindauer (bzw. Bewölkung, Verschattung)	I	III	0	II
	Lufttemperatur	I	II	0	III
	Niederschlag (Regen, Hagel, Schnee)	II	I	0	III
	Windgeschwindigkeit	0	0	III	I
	Geländerauigkeit	0	0	III	0
	extreme Wetterlagen (Frost, Nässe, Hitze, Sturm, etc.)	I	I	II	II
	stoffliche Einflüsse z.B. durch Meersalz, CO ₂	0	0	I	I
	Untergrund- / Bodeneigenschaften / Bodenverhältnisse	III	I	II	III
	TECHNIK				
	Anlagenart/ -typ	III	III	III	III
	Anlagentechnik	III	III	III	III
	Anlagendimension	III	III	III	III
Anlagenbetrieb / Prozessablauf	III	III	III	III	
indirekter Einfluss auf die Nutzung der Energie	RECHT				
	Bau- u. Planungsrecht				
	Baugesetzbuch (BauGB)	I	II	III	III
	Landesbaugesetze (LBauO)	I	III	III	III
	Umweltschutz- u. Technikrecht				
	Bundesnaturschutzgesetz (BNatSchG)	II	II	II	II
	Naturschutzgesetze der Länder (LNatSchG)	II	II	II	II
	Bundesimmissionsschutzgesetz (BImSchG)	I	I	II	III
	Wasserhaushaltsgesetz (WHG)	III	0	0	II
	Landeswassergesetze (LWG)	III	0	0	II
	Bundesberggesetz (BbergG)	III	0	0	0
	Energierrecht				
	Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG)	III	III	III	III
	Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz (EEWärmeG)	II	II	II	II
WIRTSCHAFT					
Investitionskosten	III	III	III	III	
Betriebskosten	III	III	III	III	
Erträge	III	III	III	III	
Fördermöglichkeiten	III	III	III	III	

0 – keine / I – geringe / II – mittlere / III – große Bedeutung

Ao-Geo – Oberflächennahe Geothermie, PV – Photovoltaik, WK – Windkraft, BG - Biogas

7 Zusammenfassung

Zur Anpassung an den Klimawandel gehört u.a. der Wechsel von fossilen sowie atomaren Energieressourcen auf die erneuerbaren Energien. Für ihre nachhaltige und effiziente Nutzung müssen die erneuerbaren Energien auf ihre Entwicklung hinsichtlich des Klimawandels untersucht und ihre Nutzung angepasst werden.

Grundlage für die Untersuchung der möglichen Auswirkungen des Klimawandels auf die erneuerbaren Energien und ihrer zukünftigen Nutzung, ist die ausführliche Erfassung ihrer Einflussfaktoren.

Ziel und Aufgabe des Berichts war es deshalb wichtige Parameter mit Einfluss auf die Nutzung der erneuerbarer Energien Geothermie, Photovoltaik, Windkraft und Biogas zu ermitteln, sie den einzelnen Energieformen zuzuordnen und nach Art ihrer Einflussnahme (direkt/indirekt) zu unterscheiden.

Zur Erfassung und Einordnung der Parameter wurde auf folgende Fragen eingegangen:

1. Welche Parameter beeinflussen die Nutzung der erneuerbaren Energien (oberflächennahe Geothermie, Windenergie, Photovoltaik, Biogas)?
2. Welche Parameter haben einen direkten bzw. indirekten Einfluss auf die Nutzung der erneuerbaren Energien?
3. Wie wird sich der Klimawandel auf die Parameter und damit auf die Nutzung der erneuerbaren Energien auswirken?

Die Erkenntnisse des Berichts sind eine Vielzahl ermittelter Parameter, die in vier Kategorien unterteilt wurden. Dies sind die Bereiche Natur, Technik, Recht und Wirtschaft. Weiterhin wurde festgestellt, dass die natürlichen und technischen Parameter einen direkten Einfluss die rechtlichen und wirtschaftlichen Parameter indirekt Einfluss auf die Nutzung der erneuerbaren Energien ausüben.

Durch den Einfluss des Klimawandels unterliegen die einzelnen Parameter Veränderungen, die sich auf die Nutzung der erneuerbaren Energien auswirken wird und evtl. Anpassungen bedürfen. Die Art und Relevanz der Veränderungen der Parameter werden im vorliegenden Bericht nur übersichtlich behandelt. Auf dieses Thema wird in den folgenden Einzelberichten zu den jeweiligen Energieformen ausführlicher eingegangen werden.

8 Quellen

Einleitung

- [1] **UBA** – Umweltbundesamt, Globaler Klimawandel – Tatsachen – Risiken – Handlungsmöglichkeiten, Stand April 2005
- [2] **BMU** – Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit zum Thema Klima und Energie (www.bmu.de/klima_energie/doc/41060.php)
- [3] **KomPass** – Kompetenzzentrum Klimafolgen und Anpassung (www.anpassung.net)
- [4] **KLIMZUG** – Klimawandel in Regionen zukunftsfähig gestalten (www.klimzug.de)
- [5] **RADOST** – Regionale Anpassungsstrategien für die deutsche Ostseeküste (www.klimzug-radost.de)
- [6] **BMU** – Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Erneuerbare Energien in Zahlen – Nationale und internationale Entwicklung, Stand Juni 2009
- [7] **BfN** – Bundesamt für Naturschutz, Vorstudie Klimawandel und Naturschutz in Deutschland, BfN-Skripten 115 (2004)

Geothermie

- [8] **VDI-Richtlinie 4640** – Thermische Nutzung des Untergrunds (Blatt 1 – 4)
- [9] **SGD** – Staatliche Geologische Dienste – PK Tiefe Geothermie der Ad Hoc AG „Geologie“, Nutzungen der geothermischen Energie aus dem tiefen Untergrund (Tiefe Geothermie) – geowissenschaftliche Parameter und Untersuchungsverfahren, 24.01.2008 (<http://www.infogeo.de/dokumente>)
- [10] **ETI** – Brandenburgische Energie Technologie Initiative, Nutzung von Erdwärme in Brandenburg, Heizen und Kühlen mit oberflächennaher Geothermie: Ein Leitfaden für Bauherren, Planer und Fachhandwerker, 1. Auflage 2009
- [11] **LLUR** – Landesamt für Natur und Umwelt des Landes Schleswig-Holstein, Geothermie in Schleswig-Holstein, Leitfaden für oberflächennahe Erdwärmearanlagen, August 2006
- [12] **Geothermische Vereinigung**, Bundesverband Geothermie e.V. (www.geothermie.de)
- [13] **Steffen Benz**, Rechtliche Rahmenbedingungen für die Nutzung der oberflächennahen Geothermie, Lüneburger Schriften zum Umwelt- und Energierecht, Band 13, 2. Auflage 2009
- [14] **Erdwärme-Zeitung Online**, Erdwärme & Wärmepumpe (www.erdwaerme-zeitung.de)
- [15] **Erdwaerme-Loesung.de** – Alles aus einer Hand, Firma Helmuth Alt (www.erdwaerme-loesung.de)
- [16] **Josef Auer**, Deutsche Bank Research, Geothermie – Bauwirtschaft gewinnt wegen Klimawandel und Energieknappheit, Stand November 2009

Photovoltaik

- [19] **Frank Konrad**, Planung von Photovoltaik-Anlagen – Grundlagen und Projektierung, 2. Auflage 2008, Vieweg + Teubner Fachverlag
- [20] Grundsätze zur Planung von großflächigen Photovoltaik-Anlagen im Außenbereich, Gemeinsamer Beratungserlass des Innenministeriums, der Staatskanzlei, des Ministeriums für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume und des Ministeriums für Wissenschaft, Wirtschaft und Verkehr (Juli 2006)
- [21] **DWD** - Deutscher Wetterdienst, Globalstrahlung – Die Energie der Sonne (2007)
- [22] Solarstrahlungskarten Deutschlands (www.meteonorm.com)
- [23] **Der Solarserver** – Das Internetportal zur Sonnenenergie (www.solarserver.de)
- [24] **Solaranlagen** – Photovoltaik Tipps Planung Förderung (www.solaranlagen-portal.de)
- [25] **Solarfoerderung.de** – Ihr interaktiver Solarförderberater (www.solarfoerderung.de)
- [26] **SolarOne Deutschland AG** (www.solarone.de)
- [27] **Deutsche Solar Investment GmbH**, Informationen zur Dachvermietung für Photovoltaik-Anlagen (www.dachvermietungen.de)
- [28] **BMU** – Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Erneuerbare Energien – Innovationen für eine nachhaltige Energiezukunft (Juni 2009)
- [29] **EEG** – Gesetz für den Vorrang Erneuerbarer Energien vom 25. Okt. 2008, zuletzt geändert am 22.12.2009

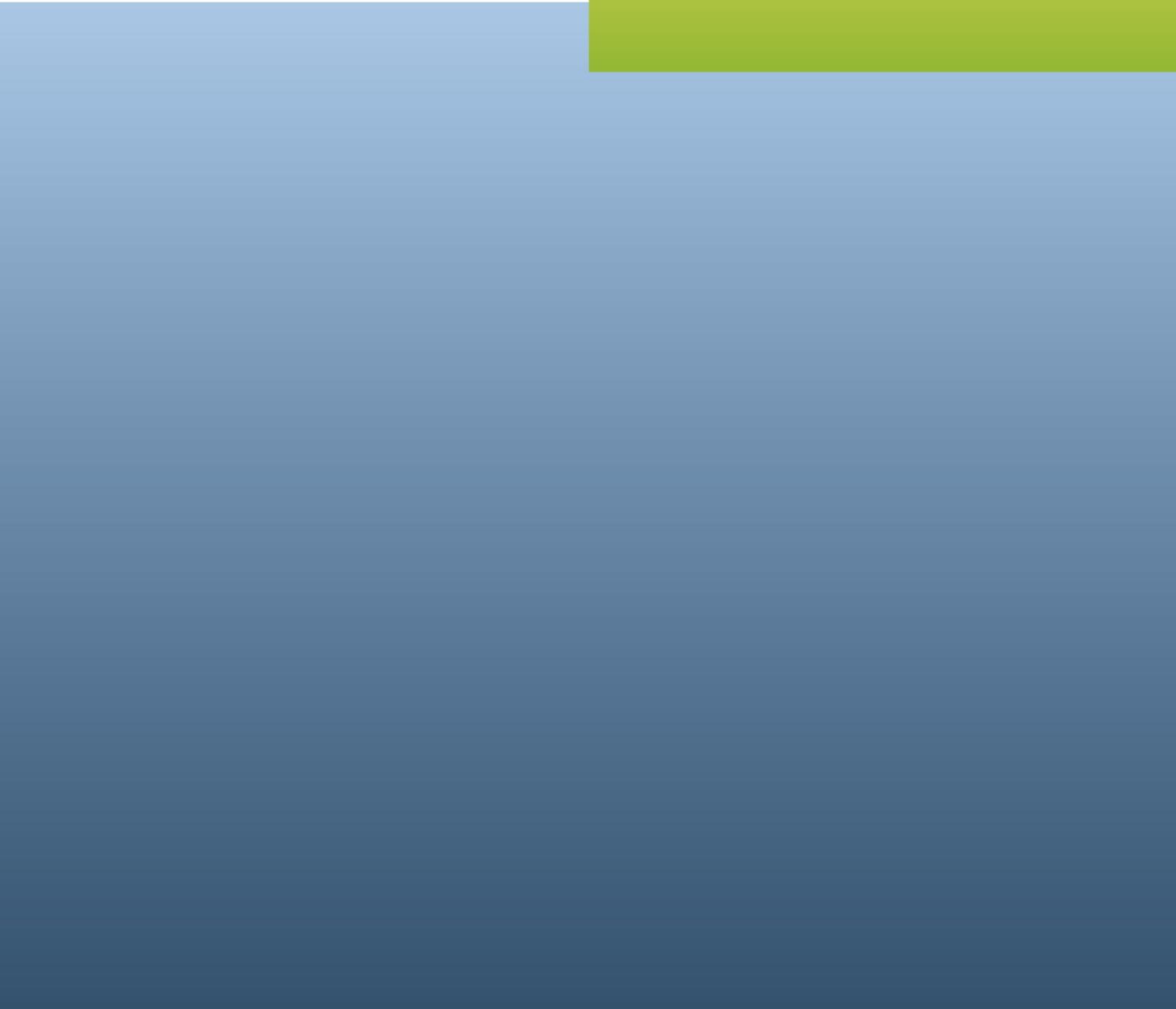
Windkraft

- [30] **BWE** – Bundesverband Windkraft e.V. (www.wind-energie.de)
- [31] **DCTI** – Deutsches CleanTech Institut, CleanTech Studienreihe Band 2 Windkraft (Nov. 2009)
- [32] **KPMG AG Wirtschaftsprüfungsgesellschaft**, Onshore-Windkraft – Repowering-Potenziale in Deutschland, Marktstudie (2009)
- [33] **BINE Informationsdienst**, Offshore – Windkraft vor der Küste, Projektinfo 05/03
- [34] **DWD** – Deutscher Wetterdienst, Wetterlexikon (www.dwd.de/lexikon)
- [35] **Umweltdatenbank**, Adressen, Produkte, Lexikon, Forum (www.umweltdatenbank.de/cms/lexikon/lexikon-w/Windkraft.html)
- [36] **SunMedia Verlags GmbH**, Erneuerbare Energien - Das unabhängige Monatsmagazin für die Zukunftsenergien, Ausgabe 3, März 2010, 20. Jahrgang
- [37] **Norddeutscher Klimaatlas** (www.norddeutscher-klimaatlas.de)

Biogas

- [38] **EEG** – Erneuerbare-Energien-Gesetz, Gesetz für den Vorrang Erneuerbarer Energien in der Fassung vom 25. Oktober 2008, zuletzt geändert am 22. Dez. 2009
- [39] **BiomasseV** – Biomasseverordnung, Verordnung über die Erzeugung von Strom aus Biomasse in der Fassung vom 21. Juni 2001, zuletzt geändert am 9. Aug. 2005

- [40] **KTBL** - Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft, Kostenrechner Energiepflanzen (<http://daten.ktbl.de/energy/index.jsp>)
- [41] **FNR** - Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V., Biogas Basisdaten Deutschland (Okt. 2009)
- [42] **Blanke, Meier, Evers**, Leitfaden für BGA – Errichtung und Betrieb von BGA im landwirtschaftlichen Bereich (2006)
- [43] **BauGB** – Baugesetzbuch in der Fassung vom 23. September 2004, zuletzt geändert am 31. Juli 2009
- [44] **BImSchG** – Bundes-Immissionsschutzgesetz, Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge in der Fassung vom 26. September, zuletzt geändert am 11. Aug. 2009
- [45] **LfU** – Bayrisches Landesamt für Umwelt, Biogashandbuch Bayern – Materialienband, 2007/09 (www.lfu.bayern.de/abfall/fachinformationen/biogashandbuch/index.htm)
- [46] **LfL** – Bayrische Landesanstalt für Landwirtschaft (www.lfl.bayern.de/ilb/technik/03029/)
- [47] **Germanwatch e.V.**, Manuel Gottschick, Biogas – Einkommensalternative für Landwirte? Kurzstudie zu Schwachstellen von BGA (Juli 2006)
- [48] **BMU** - Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Optimierungen für einen nachhaltigen Ausbau der Biogaserzeugung und –nutzung in Deutschland, Endbericht mit Materialband (Mai 2008)
- [49] **UBA** – Umweltbundesamt, Anpassung an Klimaänderung in Deutschland, Themenblatt Landwirtschaft (Dez. 2008)
- [50] **UBA** – Umweltbundesamt, Deutschland im Klimawandel, Anpassung ist notwendig (Nov. 2008)
- [51] **Fachverband Biogas e.V.**, Dipl.-Ing. agr. (FH) Martin Bensmann, Artikel „Rohstoffbasis vergrößern“ im Biogas Journal, 13. Jahrgang, Nr. 1 – 2010
- [52] **BfN** – Bundesamt für Naturschutz, Vorstudie Klimawandel und Naturschutz in Deutschland, BfN-Skripten 115 (2004)
- [53] **UBA** – Umweltbundesamt, Stand der Technik beim Bau und Betrieb von BGA, Bestandsaufnahme 2008, Texte 38/2009
- [54] **MLUV** – Ministerium für Ländliche Entwicklung, Umwelt und Verbraucherschutz des Landes Brandenburg, Biogas in der Landwirtschaft, Leitfaden für Landwirte und Investoren im Land Brandenburg (Nov. 2006)
- [55] **Herman Albers (BWE)**, neue energie - das magazin für erneuerbare energien, Nr.2 / Februar 2010



GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung